



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA, INGENIERÍA DE
SISTEMAS Y TEORÍA DE LA SEÑAL
UNIVERSIDAD DE ALICANTE**



**SOBRE LOS COLORES ÓPTIMOS
Y SUS APLICACIONES EN
VISIÓN Y TECNOLOGÍA DEL COLOR**

ESTHER PERALES ROMERO



Memoria presentada para optar al
Diploma de Estudios Avanzados

AGRADECIMIENTOS

Si hay alguien a quien debo estar especialmente agradecida es a mi familia, Miguel, Dori y David, por su apoyo, por su confianza y por haberme enseñado a ser tenaz y constante.

Un agradecimiento especial también para "Huesi", sus ánimos y su cariño han estado desde el principio, y me han impulsado a seguir hacia delante, muchas gracias.

Expresar mi agradecimiento a los directores de este trabajo, Verdú y Valentín, que junto con Dolo me han ofrecido su ayuda y consejo en todo lo que he necesitado, además de ofrecerme su amistad. También darles las gracias por haberme permitido ser parte del Grupo de Visión y Color, a todo el grupo, muchas gracias.

No quisiera olvidarme de la persona que me ha enseñado que una pirámide puede cambiar de forma en cualquier momento, Julián. Gracias por sus ánimos, consejos y sus risas, en ocasiones han sido de mucha ayuda. Tampoco pueda dejar de nombrar a Elísabet, gran compañera de trabajo y ante todo una amiga.

Esta memoria ha sido realizada en el Departamento Interuniversitario de Óptica. Quiero agradecer a todo el Departamento el haberme permitido realizar este trabajo y haberme facilitado los medios necesarios.

Sin duda, este trabajo no hubiera sido posible si no hubiera contado con la ayuda, apoyo y consejo de muchas personas. Gracias a todas aquellas personas que han confiado en mí.

SUMARIO

Periodo de docencia

1. Memoria cursos de doctorado	1
1.1 Holografía: Fundamentos, materiales de registro y aplicaciones	2
1.2 Elementos Ópticos Difractivos	8
1.3 Herramientas informáticas para el análisis de parámetros físicos	10
1.4 Técnicas de obtención y procesamiento digital de imágenes médicas	13
1.5 Ergonomía	17

Periodo de investigación

1. Estado del arte	23
1.1 Elementos básicos de la colorimetría y la percepción del color	23
1.1.1 Visión deficiente del color en humanos	33
1.1.2 Visión del color en los animales	35
1.2 Definición de color óptimo	39
1.3 Tecnologías de reproducción del color	44
1.3.1 Principios de reproducción del color	44
1.3.2 Química del color	47
1.3.3 Métodos sustractivos clásicos	53
1.3.4 Métodos modernos (aditivos y mixtos)	58

2. Definición del proyecto	75
2.1 Consideraciones iniciales	75
2.2 Cálculo de colores distinguibles según la fuente luminosa	77
2.3 Gammas de colores distinguibles en discromatopsias	79
2.4 Gammas de colores distinguibles en visión animal	81
2.5 Gammas de colores distinguibles en visión artificial	83
2.6 Gammas de colores reproducibles en la industria	85
2.6.1 Tecnologías sustractivas de reproducción	85
2.6.2 Tecnologías aditivas de reproducción	86
2.6.3 Tecnologías mixtas de reproducción	87
2.6.4 Influencia/estudio de la aplicación de colores fluorescentes y metalizados en las gammas de colores	89
3. Originalidad y novedad de la propuesta	91
4. Resultados preliminares	95
4.1 Cálculo del sólido de color según varias fuentes luminosas	95
4.2 Comparativa de las gammas de colores de varias tecnologías de impresión	116
4.3 Comparativa de gammas de colores de diferentes tipos de papel con la misma tecnología de impresión	125

5. Viabilidad	139
5.1 Obtención de datos: visión animal y deficiente e industrias de coloración/reproducción del color	139
5.2 Instrumentación necesaria	141
6. Interés industrial, transferencia de resultados y personas	145
7. Plan de trabajo con estimación de calendario	149
7.1 Optimización de los resultados preliminares	149
7.2 Cronograma de las fases/etapas	150
8. Referencias	153
ANEXO	163
Espacios de color	163
Simulación computacional de colores	175



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



PERIODO DE DOCENCIA

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA, INGENIERÍA
DE SISTEMAS Y TEORÍA DE LA SEÑAL**

1. Memoria de los cursos de doctorado

Los cursos realizados en el programa de doctorado "Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal" han sido los siguientes:

- Holografía: Fundamentos, materiales de registro y aplicaciones
- Elementos Ópticos Difractivos
- Herramientas informáticas para el análisis de parámetros físicos
- Técnicas de obtención y procesamiento digital de imágenes médicas
- Ergonomía

A continuación se presenta un breve resumen del contenido de dichos cursos.

1.1 Holografía: Fundamentos, materiales de registro y aplicaciones

Profesores responsables:

- Augusto Beléndez Vázquez
- Inmaculada Pascual Villalobos
- Cristian Neipp López
- Andrés Marquez Ruiz

El inventor de la holografía fue Dennis Gabor (1900-1981), quién buscaba un método para mejorar la resolución y definición del microscopio electrónico. Gabor se propuso realizar esto mediante un proceso de registro fotográfico de imágenes al que llamó *holografía*, que viene del griego *holos*, que significa completo, pues el registro que se obtiene de la imagen es completo, incluyendo la información tridimensional.

La holografía consta de una primera fase (fase de registro) y de una segunda fase denominada fase de reconstrucción. En la fase de registro primero se ilumina con un haz láser el objeto cuya imagen se quiere registrar. Se coloca después una placa fotográfica en una posición tal que a ella llegue la luz tanto directa del láser, o reflejada en espejos planos, como la que se refleja en el objeto cuya imagen se desea registrar. Al haz directo que no proviene del objeto se le llama haz de referencia y al otro se le llama haz del objeto. Estos dos haces luminosos interfieren al coincidir sobre la placa fotográfica. La imagen que se obtiene después de revelar la placa es un patrón de franjas de interferencia. La fase de registro consiste en lo siguiente: ya revelado el holograma, para reconstruir la imagen se coloca éste frente al haz directo del láser, en la posición original donde se colocó para exponerlo. La luz que llega al holograma es entonces difractada por las franjas impresas en el

holograma, generando tres haces luminosos. Uno de los haces es el que pasa directamente sin difractarse, el cual sigue en la dirección del haz incidente y no forma ninguna imagen. El segundo haz es difractado y es el que forma una imagen virtual del objeto en la misma posición donde estaba al tomar el holograma. El tercer haz también es difractado, pero en la dirección opuesta al haz anterior con respecto al haz directo. Este haz forma una imagen real del objeto.

La mesa que sustenta el montaje de todos los elementos, debe ser necesariamente estable, es decir, aislada de las vibraciones del piso, a fin de que las pequeñísimas franjas de interferencia que forman el holograma no se pierdan. Observando a través del holograma como si fuera una ventana, se ve la imagen tridimensional del objeto (la imagen virtual) en el mismo lugar donde estaba el objeto originalmente. La imagen es tan real que no sólo es tridimensional o estereoscópica, sino que además tiene perspectiva variable, dentro de los límites impuestos por el tamaño del holograma.

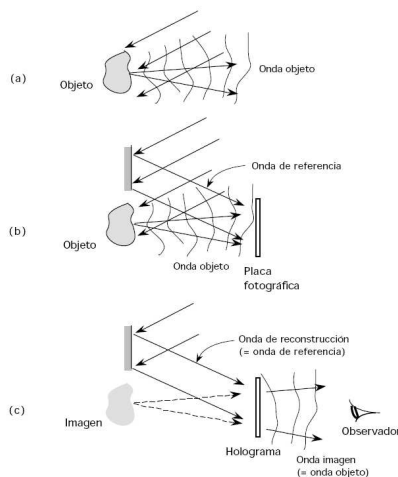


Figura 1. (a)Onda proveniente de un objeto. (b)Esquema del registro de un holograma. (c)Reconstrucción de un holograma.

Cuando se registra la interferencia de dos ondas en un medio holográfico, se modifican algunas de sus propiedades ópticas como son la conductividad y/o el índice de refracción que pasan a ser proporcionales a la intensidad registrada (si se trabaja en la zona lineal de la curva de transmitancia frente a exposición del material correspondiente). La intensidad de la interferencia de dos ondas varía sinusoidalmente con la diferencia de fase entre esas dos ondas en cada punto del espacio. Los planos de intensidad constante son un conjunto de planos paralelos, ortogonales al plano definido por los vectores de propagación de las dos ondas de registro y que contienen a la dirección de la bisectriz del ángulo que forman estos dos vectores de onda. Estos planos también definen por tanto los puntos donde las características ópticas del material toman un mismo valor. En el caso de que se produzca la variación o modulación sinusoidal del índice de refracción se habla de redes holográficas de fase, cuando se produzca la modulación de la conductividad, de redes de amplitud; se consideran redes mixtas aquellas en las que ambos parámetros están modulados.

En función de la relación existente entre el valor del periodo de la red Λ (distancia entre los planos en los que las propiedades del material toman un mismo valor) y el espesor d del material en el que se registra esta red, se distingue entre hologramas delgados si el periodo de la red es comparable a su espesor ($\Lambda/d \gg 1$) y hologramas de volumen donde el periodo es mucho menor que el espesor ($\Lambda/d \ll 1$). En el caso de redes delgadas no se registra una estructura de planos paralelos dentro del material, ya que éste presenta un espesor menor o igual que la separación que existe entre ellos y sólo aparece una estructura o red superficial como responsable de los procesos difractivos. Al incidir sobre una red delgada con una onda electromagnética, se obtendrá a la salida luz propagándose en un conjunto discreto de direcciones, determinadas por la dirección de propagación del haz incidente, su longitud de

onda y el periodo superficial de la red. En una red de volumen, como la separación de los planos en los que la intensidad de registro es constante es mucho menor que el espesor de la emulsión, la red periódica registrada está formada por un conjunto de planos paralelos. En este caso, sólo para un rango limitado de direcciones de incidencia se obtiene luz a la salida difractada en una dirección distinta a la de la onda incidente. Sólo existe un orden difractado. Las condiciones de difracción son más restrictivas porque ahora se debe de producir la interferencia constructiva de la luz dispersada por un conjunto de planos.

Los hologramas también pueden clasificarse como hologramas de transmisión y de reflexión, si la imagen registrada en el holograma se reconstruye por transmisión o por reflexión del haz de lectura sobre el holograma. En los hologramas de reflexión el haz objeto y el de referencia inciden sobre caras distintas de la placa holográfica, mientras que en los hologramas de transmisión ambos haces inciden sobre la misma cara (la cara de la emulsión).

Los materiales de registro más empleados son: las emulsiones fotográficas, las gelatinas dicromatadas, fotorresinas, fotopolímeros y materiales fotorrefractivos. Todos ellos tienen en común el hecho de que sus propiedades se modifican por la acción de la energía luminosa, aunque los procesos físico-químicos que se desencadenan por esta acción son distintos.

Las emulsiones fotográficas están constituidas por una capa de gelatina que contiene haluros de plata sobre soporte de vidrio, película o acetato. Por la absorción de energía luminosa, los haluros de plata se disocian. Los iones halogenuro negativos liberan un electrón que es absorbido por el catión de plata generándose plata metálica. De esta manera la incidencia de la luz forma una imagen latente que posteriormente debe ser revelada generando más átomos de plata allí donde la energía absorbida ha sido mayor. Así se consigue un ennegrecimiento de la emulsión proporcional (si se

trabaja en la zona lineal de exposición) a la intensidad incidente. Esto hace que las franjas de interferencia generadas por la superposición de las ondas de registro modulen la transmitancia del holograma. Estas diferencias de densidad óptica pueden transformarse en diferencias de índice de refracción a través de diversos procesos de blanqueo, en los que los hologramas de amplitud se transforman en hologramas de fase.

Las gelatinas dicromatadas están formadas por una capa de gelatina impregnada de dicromato de amonio. Por la llegada de la energía luminosa se produce la reducción del ión dicromato produciéndose alteraciones de la dureza y la solubilidad de la emulsión que pueden transformarse en variaciones de fase tras un procesamiento químico del material.

Los materiales fotopolímeros consisten en una base polimérica en la que se depositan moléculas elementales o monómeros junto con sistemas iniciadores de los procesos de polimerización de estos monómeros, procesos que se originan ante la llegada de la energía luminosa. Este proceso se produce a tiempo real y no necesita de un procesamiento químico posterior. La polimerización produce una variación del índice de refracción originándose hologramas de fase.

Las fotorresinas son moléculas orgánicas sensibles a la luz que provoca procesos de polimerización que dan lugar a una mayor o menor solubilidad del material en las zonas expuestas. Esto produce la formación de redes de fase por variación del espesor del material tras un procesamiento químico.

En los materiales fotocrómicos, los fotones de luz producen la variación del espectro de absorción, lo que produce un cambio en la coloración del material generándose redes holográficas de amplitud. Por último, en los materiales fotorrefractivos la variación de las propiedades ópticas con la iluminación se produce por efecto fotorrefractivo, que básicamente consiste en la fotoexcitación de electrones que se desplazan a lo largo de la red cristalina hasta que

son atrapados por huecos presentes en las zonas no expuestas. Esta redistribución de cargas produce una modulación del índice de refracción por lo que los hologramas registrados en este tipo de materiales son de fase. Al igual que en los fotopolímeros, estos materiales no requieren un procesamiento químico posterior.

Las aplicaciones de la holografía son muchas y muy diversas; podemos citar algunas de ellas:

- Artísticas y comerciales: Reconstrucción de imágenes en 3-D y en colores dando la sensación de relieve.
- Interferometría holográfica:
 - Determinación de propiedades de materiales
 - Ensayos no destructivos
 - Información sobre reacciones químicas
- Correcciones de aberraciones de lentes convencionales
- Litografía holográfica: Fabricación de circuitos integrados
- Procesado óptico de la información
- Sistemas de seguridad: Tarjetas de crédito, videocasetes, pasaportes
- Elementos ópticos holográficos: Redes de difracción, lentes, espejos, escáneres, visores, concentradores solares, lectores de CD, interconectores.

1.2 Elementos Ópticos Difractivos

Profesores responsables:

- Augusto Beléndez Vázquez
- Inmaculada Pascual Villalobos
- Cristian Neipp López
- Andrés Marquez Ruiz

Los procesadores coherentes son sistemas que proporcionan una redundancia nula en el tratamiento de la información, por lo que son muy vulnerables al ruido coherente generado por la presencia de polvo o defectos en los elementos ópticos. Por todo ello, aparte de este procesado convencional, es cada vez más frecuente en óptica el diseño de dispositivos que trabajen con iluminación espacialmente incoherente y/o con luz blanca. Estos nuevos sistemas se caracterizan por una mayor insensibilidad a la falta de estabilidad mecánica lo que les permite una mejor adaptación al entorno que sus homólogos coherentes.

Sin embargo, debido a la dependencia explícita del fenómeno de difracción con la longitud de onda de la radiación incidente, el uso de luz de ancho de banda extenso conduce a la distorsión cromática de los patrones de difracción, tanto de Fresnel como de Fraunhofer, imposibilitando la utilización directa de los procesadores ópticos convencionales en el caso de luz blanca.

Una forma de encarar esta situación es mediante el empleo de sistemas ópticos que sean capaces de compensar simultáneamente, para todas las longitudes de onda, la dispersión cromática inherente al fenómeno de la difracción. De este modo, un patrón de difracción debe estar localizado en un único plano y poseer la misma escala para todos los canales monocromáticos de la fuente de iluminación.

Los sistemas acromáticos son aquellos dispositivos que cumplen este requisito en una aproximación a primer orden.

En general, para compensar la dispersión cromática de los patrones de difracción, es necesaria la utilización de elementos ópticos fuertemente dispersivos. De entre ellos, los elementos ópticos difractivos proporcionan un amplio abanico de posibilidades al trabajar por difracción. Además, se pueden fabricar fácilmente con la tecnología actual: fotolitografía, escritura directa con láser, holografía, etcétera, por lo que su uso está muy extendido.

Los elementos ópticos holográficos (EOH) son un tipo especial de elementos difractivos generados por el registro holográfico de dos o más frentes de onda. Los EOHs se adaptan a funciones ópticas específicas y son relativamente fáciles de producir en un laboratorio convencional. Un holograma registrado mediante la interferencia de dos haces procedentes de fuentes puntuales se comporta como una lente. Para obtener EOHs de alta eficiencia es preciso registrar hologramas de volumen. Estos elementos holográficos presentan una serie de ventajas frente a otros elementos convencionales ya que son de fácil fabricación y reproducción, son elementos de gran tamaño pero reducido peso, pueden realizar múltiples funciones a la vez y son de menor coste que los elementos convencionales refractivos o reflectivos. Pero tienen otros inconvenientes, presentan más aberraciones que los elementos convencionales y además es necesario trabajar con luz monocromática.

Algunos elementos ópticos holográficos son las lentes holográficas y los espejos holográficos. Ambos trabajan como un holograma: tendrá una etapa de registro, donde se producen interferencias entre dos ondas o mediante un ordenador, y una fase de reconstrucción que tiene lugar por difracción. Estas lentes y espejos holográficos son capaces de realizar las mismas funciones que un elemento óptico convencional e incluso otras funciones.

1.3 Herramientas informáticas para el análisis de parámetros físicos

Profesores responsables:

- Pedro Jauregui Eslava
- Julio Luis Rosa Herranz

Con este curso se pretendió analizar los datos procedentes de un radar penetrante de tierra o georradar, con lo que primero veremos en que consiste este dispositivo y sus aplicaciones que pondrán de manifiesto la importancia de un buen análisis de los datos proporcionados por el radar. En este caso en particular se trabajo con el software MATLAB, con el fin de conseguir un programa que nos ayudase a analizar e interpretar dichos datos.

El radar penetrante de tierra a veces es llamado georradar o subsuperficie, o GPR, es una herramienta geofísica no intrusiva la cual permite bajo condiciones óptimas, la caracterización del subsuelo y estructuras. En el GPR un breve pulso de energía electromagnética es irradiado hacia el subsuelo, con una frecuencia característica única que puede estar entre 16 y 2.000 MHz. Cuando este pulso alcanza los interfaces donde existe un contraste en la constante dieléctrica una fracción de la energía de la onda es reflejada, regresa hasta la superficie y es detectada en la antena receptora, mientras la energía remanente continúa hasta la próxima interfase. La profundidad de penetración y la resolución observada depende del tipo de antena usada para una adquisición particular.

El GPR genera una imagen del subsuelo con altísima resolución lateral y vertical, permitiendo no solamente la identificación de algunos objetos, sino caracterizar el entorno. Es el método moderno de más éxito ya que no hay necesidad de realizar excavaciones o algún otro tipo de intervención destructiva. Por esto

es un método que no afecta el medio ambiente y es excelente para las fases de planificación y desarrollo de proyectos industriales.

Algunas de las aplicaciones del GPR son:

- Detección de utilidades metálicas y no-metálicas (tuberías, cables, etc.).
- Identificación de cavidades y estructuras enterradas (tanques, objetos militares, túneles, etc.).
- Inspección y caracterización de construcciones (puentes, muros, etc.).
- Inspección del pavimento de autopistas, pistas de aeropuertos, ferrovías.
- Clasificación del sustrato y condiciones de fracturamiento del subsuelo.
- Mapeo de aguas subterráneas. (acuíferos, acuícludas, etc.)
- Medio Ambiente (mapeo y delineamiento de terrenos y fluidos contaminados).
- Caracterización de sitios arqueológicos y estudios forenses/seguridad policial.

Además del equipo, la frecuencia y la configuración de las antenas a utilizar en función del objetivo de investigación y ambiente geológico, los siguientes factores son de gran importancia para la calidad de los datos y la capacidad de resolución de ciertas problemáticas.

Velocidad de Adquisición. Está relacionada con la resolución lateral del estudio. La velocidad de adquisición va a depender de las condiciones de la superficie de la zona de estudio, de los medios de transporte disponibles y de las dimensiones del equipo.

Distancia entre medidas. La distancia entre las mediciones es de suma importancia ya que controla la resolución del estudio:

cuando la distancia entre las medidas es menor, la posibilidad de detectar un objeto es mayor.

Modalidad y Diseño de Adquisición de Campo. En el modo óptimo de operación se necesita primero establecer una cartografía y un punto de referencia en la zona de trabajo, después diseñar un sistema de adquisición, una red de puntos de adquisición que responda a las necesidades de la investigación

Muchos factores limitan el desempeño del Georradar, como por ejemplo, la atenuación de las ondas irradiadas, ruidos externos, ruidos instrumentales, etc. Por esto, antes de interpretar cualquier tipo de datos de georradar es necesario realizar un procesamiento de los datos, con el objeto de mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido.

El georradar utilizado para adquirir los datos de determinadas sub-superficies de la zona de Alicante fue el georradar GISCO y como se ha dicho anteriormente con ayuda del software MATLAB se diseñó un programa que consistía en visualizar los datos mediante gráficos en color. Se intentó aislar los objetos enterrados previamente en el terreno a estudiar, en este caso se trataba de diferentes raíces de distinto tamaño. La finalidad era encontrar una relación entre la reflectividad de dichas raíces y su masa, con el fin de determinar que cantidad de biomasa hay en el subsuelo estudiado, y poder aplicar dicho programa en zonas no conocidas previamente. Se consiguió visualizar los datos en gráficos de color y determinar las zonas en las que estaban enterradas las raíces, quedando pendiente encontrar la relación exacta entre masa y reflectividad.

1.4 Técnicas de obtención y procesamiento digital de imágenes médicas

Profesores responsables

- Alfonso Panchón Ruiz
- Fernando Torres Medina

En la actualidad son muchas los sistemas o dispositivos que trabajan con imágenes, de ahí la gran importancia del tratamiento de estas imágenes para su posterior análisis con el fin de extraer la máxima información posible sobre ellas o para mejorar su calidad dependiendo de las necesidades. Se describe brevemente el modo en el que se tratan dichas imágenes y métodos para mejorar su calidad.

En nuestra vida cotidiana estamos acostumbrados a utilizar imágenes de dos dimensiones (aunque el paso a tres dimensiones es fácil), por tanto se puede representar una imagen como una función de dos variables $f(x, y)$ donde x e y son las coordenadas en un espacio bidimensional y los valores de la función representan la información visual de cada punto.

El proceso de digitalización de una imagen consiste en convertir la imagen de un formato continuo en el que existe en el mundo real a una representación numérica utilizable por el ordenador. Esta conversión se realiza en dos niveles y para comprenderla hay que tener algunos fundamentos de luz y color.

El resultado de la digitalización viene determinado por dos parámetros: por un lado el muestreo, que afecta a la resolución, es decir al número de píxeles, y por otro la cuantificación, que afecta a los niveles de luminosidad, es decir el número de colores. En cierta medida se pueden corregir estos efectos mediante técnicas de filtrado para mejorar la calidad de la imagen.

Estas técnicas son las operaciones más sencillas y más utilizadas del tratamiento digital de imágenes y con ellas se pretende destacar detalles de interés, por ejemplo, aumentar el contraste de la imagen para que tenga "mejor aspecto".

Los métodos de mejora de imagen se pueden dividir en dos campos diferentes: métodos en el dominio frecuencial y métodos en el dominio espacial. Los primeros se basan en modificar la transformada de Fourier de la imagen, mientras que los segundos se basan en manipulaciones directas sobre los píxeles de la imagen.

Se conocen distintas técnicas que trabajan en el dominio espacial, como las técnicas de modificación del histograma, que van principalmente enfocadas a mejorar la visualización de una imagen. El histograma de una imagen es un gráfico que ofrece una descripción global de la apariencia de la imagen.

Otra técnica importante en este sector es el filtrado espacial, es la operación que se aplica a imágenes para mejorar o suprimir detalles espaciales con el fin de mejorar la interpretación visual. Ejemplos comunes incluyen aplicar filtros para mejorar los detalles de bordes en imágenes, o para reducir o eliminar patrones de ruido. Una característica común a todos estos tipos de datos es la llamada "frecuencia espacial", que define la magnitud de cambios de los datos por unidad de distancia en una determinada zona de la imagen. Áreas de la imagen con pequeños cambios o con transiciones graduales en los valores de los datos se denominan áreas de bajas frecuencias (como por ejemplo la superficie de una masa de agua en reposo). Áreas de grandes cambios o rápidas transiciones se conocen como áreas de altas frecuencias (por ejemplo suelo urbano con densas redes de carreteras). Así, los filtros espaciales se pueden dividir en tres categorías:

- Filtros pasa-baja: Enfatizan las bajas frecuencias, suavizando las imágenes y suprimiendo ruidos. Se trata de asemejar el nivel digital (ND) de cada píxel al nivel digital de los píxeles

vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de la imagen. Ello produce un emborronamiento de los bordes, perdiéndose en nitidez visual de la imagen, pero ganando en homogeneidad.

- Filtros pasa-alta: Enfatizan las altas frecuencias, para mejorar o afilar las características lineales como carreteras, fallas, o límites en general. Realizan por tanto el efecto contrario a los filtros pasa-baja.
- Filtros detectores de bordes: Realizan otro tipo de operaciones con los datos, pero siempre con el resultado de enfatizar los bordes que rodean a un objeto en una imagen, para hacerlo más fácil de analizar.

Podemos distinguir entre diferentes filtros, siendo los más conocidos el filtro de la media, de la mediana, el filtro de Sobel, el filtro Laplaciano...

El dominio frecuencial, como se ha dicho, consiste en modificar la transformada de Fourier. También puede realizarse el proceso de filtrado, con mayor grado de comprensión que en el dominio espacial, ya que en una imagen en dominio frecuencial se sabe dónde se encuentran los distintos rangos de frecuencias.

En este caso también podemos hablar de filtros de pasa-alta o filtros de pasa-baja, destacando el filtro Butterworth y el Gausiano.

A parte de estas técnicas de mejora de calidad, hay que destacar también las técnicas de restauración, que consisten en corregir la degradación sufrida por una imagen. Esta técnica es diferente de las técnicas de mejora de la calidad, ya que éstas se basan en criterios personales. La degradación de una imagen se puede modelar mediante una función de transformación lineal y un ruido, el algoritmo de restauración permite obtener una estimación de la imagen original.

La representación digital de una imagen, usualmente requiere enormes cantidades de recursos del sistema en forma de memoria. Es por ello que las técnicas de codificación son de una importancia tremenda, de cara a lograr la máxima eficiencia en este sentido. Es de señalar, como en casi todas las técnicas, que el tratamiento concreto a realizar dependerá en gran medida de la aplicación a la que vaya dirigido. No es lo mismo almacenar una imagen para luego analizar hasta el nivel de cada píxel (como puede ocurrir en muchas aplicaciones de teledetección), que transmitir una imagen de videoconferencia en tiempo real, donde no es tan importante la precisión.

1.5 Ergonomía

Profesor responsable:

- Alfonso Panchón Ruiz

La ergonomía es el estudio del trabajo en relación con el entorno en que se lleva a cabo (el lugar de trabajo) y con quienes lo realizan (los trabajadores). Se aplica para determinar cómo diseñar o adaptar el lugar de trabajo al trabajador, a fin de evitar distintos problemas de salud y de aumentar la eficiencia. En otras palabras, para hacer que el trabajo se adapte al trabajador en lugar de obligar al trabajador a adaptarse a él. La ergonomía es una ciencia de amplio alcance que abarca las distintas condiciones laborales que pueden influir en la comodidad y la salud del trabajador, estudiando factores como la iluminación, el ruido, la temperatura, las vibraciones, el diseño del lugar en que se trabaja, el de las herramientas, el de las máquinas, el de los asientos y el calzado y el del puesto de trabajo. Además deben estar incluidos elementos como el trabajo en turnos, las pausas y los horarios de comidas. En este curso hemos realizado un pequeño análisis y estudio sobre ergonomía visual, ya que nuestro campo de trabajo es la Física de la Visión.

La Ergonomía visual estudia la interacción de tres elementos fundamentales: organismo, visión y entorno. El objetivo será conseguir un ambiente y unas condiciones de trabajo en relación con la tarea y las capacidades del trabajador, que sea cómodo y eficaz y que permitan la realización de la actividad sin menoscabo de su salud.

El gran desarrollo que ha tenido la tecnología en estos últimos años ha hecho que muchos trabajadores se vean obligados a pasar la mayor parte del tiempo de su jornada laboral frente a pantallas de visualización de datos (PVDs) por lo que será necesario un

control eficaz y eficiente de esta información visual. Las PVDs se definen como dispositivos electro-ópticos que sirven para mostrar información al ser humano, ya sea en formato texto, figuras, imágenes, etc., de forma que éste la pueda manipular, cambiar, transmitir, etc. Por ejemplo, los ordenadores para distintas aplicaciones, desde la ofimática general hasta su uso para la vigilancia, consola de videojuegos, teléfonos móviles, visor de radiografías... Como vemos son muchas las aplicaciones de las PVDs de ahí la gran importancia de un buen uso de éstas, para así evitar una serie de problemas, comúnmente agrupadas bajo la denominación de "Síndrome del Ordenador" que se manifiesta con algunos de estos síntomas: cansancio ocular, dolor de ojos, dolor de cabeza, visión borrosa de cerca, lentitud en el cambio de acomodación, aumento de la sensibilidad al deslumbramiento, ojos irritados, rojos, secos, molestias en las lentes de contacto, dolor de cuello y hombros, dolor de espalda, etc.

La fatiga visual surge en ocasiones después de una tarea prolongada con PVDs. Los factores que pueden estar implicados en este efecto son debidos al estado de visión del usuario de PVDs, a factores optométricos, y también a factores ergonómicos o ambientales, como pueden ser: poca cantidad lagrimal en el usuario, deslumbramiento y reflejos del monitor, mal ajuste del monitor (brillos, reflejos...). Una vez conocidos todos estos datos, tanto optométricos como ergonómicos, podemos proporcionar confort visual a los usuarios de PVDs, siendo prioritario el tratamiento de los problemas visuales del usuario y después los problemas ergonómicos.

Como sabemos, la tecnología ha puesto a nuestro alcance toda una serie de soluciones en cuanto a pantallas; las más características son:

- *Pantalla de plasma de gas*, presenta una mayor nitidez de imagen y resolución pero también un inconveniente que es su elevado coste.
- *Pantalla de rayos catódicos (CRTs)*. Son quizá el sistema más común para la representación de imágenes. Los CRTs son autoiluminados, es decir, producen su propia luz.
- *Pantalla de cristal líquido (LCDs)*, son modificadores de luz en vez de ser generadores de luz. Es decir: se limitan a bloquear el paso de la luz.

Debemos analizar esta variedad de tecnologías de pantallas y ver si alguna de ellas es superior ergonómicamente hablando que el resto, o si solamente la tendencia actual del mercado se debe exclusivamente a factores económicos y no técnicos. A la hora de diseñar la PVD ideal desde el punto de vista ergonómico se debería tener en cuenta distintos factores visuales, como son las limitaciones de la pantalla a la hora de presentar la información y saber cuál son los parámetros que nos interesan del ojo como receptor de la información visual de la pantalla. Una vez conocido todo esto ya podemos desarrollar una serie de medidas y pautas con el fin de proporcionar confort visual para el trabajador, establecer un nivel óptimo de iluminación, evitar deslumbramientos, equilibrios de luminancias, ejercicios de terapia visual, etc.

Los cambios que se han ido produciendo en los lugares de trabajo se originaron como consecuencia del deseo de mejorar la eficiencia o satisfacer presiones externas. La gran mayoría de estos cambios han sido de carácter tecnológico. Sin embargo, aquellos que proponían el cambio no fueron realmente conscientes del impacto de la nueva tecnología, de ahí la importancia de la ergonomía visual para controlar todo esto y hacer que el trabajador realice su tarea de un modo eficiente y cómodo.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



PERIODO DE INVESTIGACIÓN

**SOBRE LOS COLORES ÓPTIMOS
Y SUS APLICACIONES
EN VISIÓN Y TECNOLOGÍA**

1. Estado del arte

1.1. Elementos básicos de la colorimetría y la percepción del color

El sistema visual humano es capaz de analizar y procesar información de nuestro entorno que conduce a la percepción del color, de la forma, de la textura, de la profundidad y del movimiento. El objetivo de la Ciencia de la Visión es comprender cómo se realiza dicho procesado. El proceso visual consta de una primera fase, la detección de energía radiante y una segunda parte que es el procesado de dicha energía para obtener la información que nos proporciona una percepción de nuestro entorno.

De todo el espectro electromagnético el ojo humano es capaz de detectar una pequeña parte, denominada espectro visible, comprendido en el intervalo de longitudes de onda entre 380 y 780 nm aproximadamente.

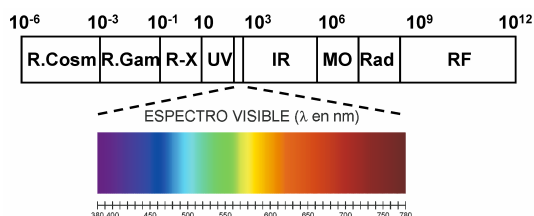


Figura 2. Espectro electromagnético remarcando la franja (espectro visible) al que es sensible el ojo humano.

Un estímulo dado se percibirá, esencialmente, de un color u otro dependiendo de tres factores: la fuente luminosa, la composición espectral del objeto, es decir, del conjunto de longitudes de onda que sea capaz de transmitir o reflejar y el ojo humano que observa la luz emitida, reflejada o transmitida por ese objeto. La sensación de color que experimentamos proviene de la interpretación por el cerebro de las señales que recibe el ojo, a través del nervio óptico, en respuesta a los estímulos de la luz.

Vamos a analizar en primer lugar el conjunto de elementos ópticos del ojo que forman la imagen de la luz incidente sobre la retina, donde se produce la detección de esa energía radiante proveniente de la escena. La Figura 3 muestra un esquema de un corte transversal del ojo, indicando algunos de los componentes más importantes. El globo ocular es una estructura esférica de aproximadamente 2.5 cm de diámetro con un marcado abombamiento sobre su superficie anterior, la córnea. La parte exterior, o la cubierta, se compone de tres capas de tejido: la capa más externa o esclerótica tiene una función protectora y se prolonga en la parte anterior con la córnea transparente; la capa media o úvea tiene a su vez tres partes diferenciadas: la coroides, el cuerpo ciliar y el iris. La capa más interna es la retina, sensible a la luz.

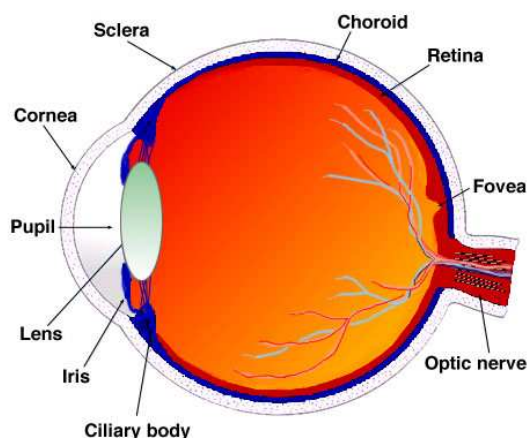


Figura 3. Sección esquemática del ojo.

La córnea es una membrana resistente, compuesta por cinco capas celulares, a través de la cual la luz penetra en el interior del ojo. Por detrás, hay una cámara llena de un fluido claro (el humor acuoso) que separa la córnea de la lente del cristalino. En sí misma, la lente es una esfera aplanada constituida por un gran número de

fibras transparentes dispuestas en capas. Está conectada con el músculo ciliar, que tiene forma de anillo y la rodea mediante unos ligamentos. El músculo ciliar y los tejidos circundantes forman el cuerpo ciliar y esta estructura tiene la capacidad de aplanar o curvar la lente, cambiando su longitud focal.

El iris es una estructura pigmentada suspendida entre la córnea y el cristalino y tiene una abertura circular en el centro, la pupila. El tamaño de la pupila depende de un músculo que rodea sus bordes, aumentando o disminuyendo cuando se contrae o se relaja, controlando la cantidad de luz que entra en el ojo.

Por detrás de la lente, el cuerpo principal del ojo está lleno de una sustancia transparente y gelatinosa (el humor vítreo) encerrado en un saco delgado que recibe el nombre de membrana hialoidea. La presión del humor vítreo mantiene distendido el globo ocular.

La retina es una capa compleja compuesta sobre todo por células nerviosas. Las células receptoras sensibles a la luz se encuentran en su superficie exterior detrás de una capa de tejido pigmentado. En la retina se encuentran dos tipos de fotorreceptores, conos y bastones, cuya activación depende del nivel de iluminación: si hay poca luz la respuesta viene dada por los bastones (nivel escotópico), y si hay mucha luz la respuesta es dada por los conos (nivel fotópico). Existe un nivel intermedio entre estos dos límites, donde tanto bastones como conos dan una respuesta, entonces hablamos de nivel mesópico.

Todos los fotorreceptores contienen pigmentos fotosensibles que absorben cuantos de luz. El fotopigmento presente en los bastones es la rodopsina, con un máximo de absorción alrededor de los 507 nm. Hay que destacar que su respuesta sólo depende del número de fotones o cuantos absorbidos, pero no de su longitud de onda, la información sobre la longitud de onda se pierde una vez que los fotones son absorbidos, a esto se le conoce como *principio de univariancia* (Rushton, 1972). Este principio afirma que la

respuesta de un cono es una variable unidimensional de la longitud de onda y la intensidad del estímulo:

$$R = f(F, \lambda) \quad (1)$$

donde

R= fotorreceptor, sensor optoelectrónico

λ = longitud de onda,

F= flujo de fotones incidentes.

Un cono que es estimulado por un estímulo monocromático de determinada longitud de onda recibe una doble entrada de información: la longitud de onda [λ] y la intensidad del flujo de fotones [F] (es decir la cantidad de fotones que alcanzan a ese cono). Sin embargo, su respuesta consiste en una única salida. Sucede que la longitud de onda únicamente va a determinar la cantidad de fotones absorbidos por el receptor y, por tanto, la intensidad de la respuesta bioquímica que inicia el proceso.

La respuesta de un cono expresada como la cantidad de fotones captados por ese cono, se puede calcular como el producto:

$$R_{\lambda} = (T_{i\lambda} * F_{\lambda}) \quad (2)$$

donde T_i es la tasa de absorción de fotones (dependiente de λ) y F es el flujo de fotones incidentes por superficie de cono.

La respuesta de la retina también varía en función del nivel de iluminación:

- En condiciones escotópicas no tenemos sensación de color y sólo sensación de luminosidad, la apariencia de un estímulo cualquiera puede describirse mediante un único parámetro, por ejemplo la radiancia del estímulo. Se define la función de sensibilidad espectral, como la respuesta a una radiación en función de la longitud de onda.

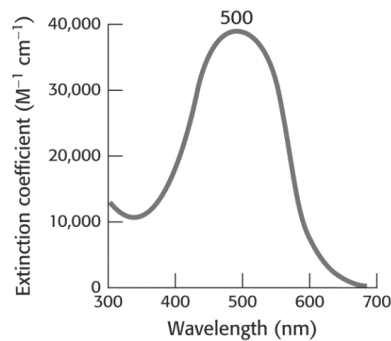


Figura 4. Curva de sensibilidad espectral de los bastones.

- En condiciones fotópicas el proceso es más complejo, ya que además de percibir luminosidad, percibimos color. Un haz de luz de una determinada longitud de onda excitará de forma diferente cada uno de los diferentes tipos de fotorreceptores, por lo que también podemos hablar de sensibilidad espectral en condiciones fotópicas.

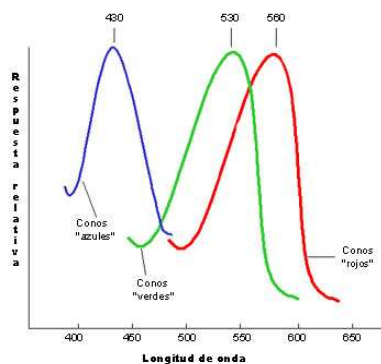


Figura 5. Curvas de sensibilidad espectral de los conos.

El color se puede definir como la percepción visual por la cual un observador puede distinguir dos objetos con la misma forma, textura y tamaño (Wyszecki, 1982). Como hemos dicho, el color es una percepción que depende de la longitud de onda, si se cambia la longitud de onda de un estímulo, su color también cambiará. Ya que el ser humano es capaz de percibir cientos de colores se podría asumir que serían necesarios cientos de conos diferentes para

codificar dichos colores. Young, en 1805, desarrolló un modelo de color alternativo, la teoría tricromática, que afirma que un color puede ser codificado únicamente mediante tres tipos de conos.

Actualmente se conoce que en el ojo humano existen tres tipos de conos, cada uno de ellos sensibles a determinadas longitudes de onda ya que cada uno de ellos tiene distintos fotopigmentos con propiedades de absorción diferentes. Estos tres tipos se denominan conos L, M y S.

- conos L, sensibles a longitudes de onda comprendidas entre 500 y 600 nm, presentando su máximo de absorción a 564 nm, pero como absorbe más longitudes de onda del rojo que los otros conos también se les llama sensibles al rojo.
- conos M, son sensibles a las longitudes de onda comprendidas entre 430 y 620 nm, y su máximo de absorción es en 534 nm, por eso también son conocidos como sensibles al verde.
- conos S, son sensibles a longitudes de onda cortas. Su espectro de absorción se extiende desde los 370 a los 530 nm, con un máximo próximo a los 420 nm. (Figura 5)

Según la teoría tricromática cualquier color puede obtenerse mediante la mezcla en proporciones adecuadas de tres colores básicos (Capilla, Artigas, Pujol, 2002), con la única condición que ninguno de estos colores pueda igualarse con una mezcla de los otros dos, a estos colores se les denomina *colores primario* (P_i). Para un color cualquiera C, siempre se tendrán dos situaciones posibles:

- a) mezclando los tres primarios en la proporción adecuada nos dará un metámero de C (dos colores son metámeros si

producen la misma sensación aún teniendo diferente composición espectral).

- b) la mezcla de dos de los primarios es un metámero de la mezcla de C y cierta cantidad del primario restante.

En ambos casos, las luminancias de los primarios que intervienen en las mezclas, denotadas por $Y_C(P_i)$ caracterizan el color C, de forma que se tiene que:

$$Y(C) = \sum_{i=1}^3 Y_C(P_i) \quad (3)$$

En cada espacio de color considerado será necesario definir un blanco de referencia W, que junto con los tres primarios P_i constituyen un sistema de representación del color. Se definen las unidades tricromáticas del sistema como las luminancias de cada primario que reproducen el blanco de referencia, $Y_W(P_i)$. Y así, un color C cualquiera se caracteriza en el sistema de representación elegido mediante sus valores triestímulo, denotados por $T_i(C)$, y definidos como la proporción de luminancia de cada primario para obtener el color C y para obtener el blanco W, es decir, normalizando a las unidades tricromáticas del sistema:

$$T_i = \frac{Y_C(P_i)}{Y_W(P_i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

A partir de los valores triestímulo, se definen las coordenadas cromáticas del color C, denotadas por $t_i(C)$, como sigue:

$$t_i(C) = \frac{T_i(C)}{\sum_{k=1}^3 T_k(C)} \quad (5)$$

Considerando estímulos espectrales, de una longitud de onda dada λ , y una radiancia patrón $E_0 = 1/k_m = 1/683 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, las funciones de igualación del color en el sistema de representación elegido son definidas como los valores triestímulo de estos estímulos espectrales, denotadas por $\bar{T}(\lambda)$:

$$\bar{T}_i(\lambda) = \frac{Y_{o\lambda}(P_i)}{Y_W(P_i)} \quad i = 1,2,3 \quad (6)$$

Los valores triestímulo no son más que una combinación lineal de las funciones de igualación, tal como se manifiesta en la siguiente ecuación:

$$T(C) = k_m \int E(\lambda) \bar{T}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Actualmente existen diferentes espacios de representación del color. En 1931 la Comisión Internacional de Iluminación (CIE, www.cie.co.at), propuso el espacio CIE-RGB, en este espacio se adoptan como primarios los colores espectrales de longitudes de onda 700, 546.1 y 435.8 nm. En ese mismo año, la CIE propuso un nuevo espacio de color, el espacio XYZ, donde el valor triestímulo Y corresponde al valor de luminancia del estímulo considerado. Sucesivamente han ido apareciendo nuevos espacios de color que pretenden solucionar problemas como la uniformidad, la influencia del entorno y del iluminante. Debido a que la percepción del color de un objeto depende de la luz que nos llega al ojo procedente del propio objeto así como del entorno, se han ido desarrollando nuevos modelos para intentar describir la apariencia del color (Fairchild 2004) de un objeto bajo cualquier condición de observación, además de perseguir la uniformidad de dicho espacio de color. Para ello, se consideraron los descriptores perceptuales del estímulo como parámetros que lo caracterizan:

- Tono (H): atributo del color por el cual el estímulo puede distinguirse de otro del mismo tamaño, forma y textura. Los posibles valores de este atributo corresponden a los nombres que habitualmente damos a los colores: azul, verde, amarillo,... La clasificación según el tono nos permite diferenciar entre estímulos acromáticos (grises) y estímulos cromáticos.
- Luminosidad (L): atributo por el cual un estímulo parece emitir más o menos luz.
- Colorido (C): atributo del color por el cual el estímulo parece ser más o menos cromático.



Figura 6. Atributos perceptuales básicos del color

Estos descriptores perceptuales tienen una correspondencia con tres magnitudes físicas medibles que también nos permiten dar la especificación numérica del estímulo color:

- Tono → *longitud de onda dominante*, estímulo monocromático que tiene el mismo tono que un estímulo cualquiera, en principio será la mezcla de varias longitudes de onda.
- Luminosidad → *luminancia*, definida como el flujo radiante de energía por unidad de ángulo sólido y superficie que emite una fuente extensa y que desencadena la respuesta sensorial del ojo (cd/m^2)
- Saturación → *pureza colorimétrica*, definida como la relación entre la luminancia del estímulo monocromático de igual tono y la luminancia del color problema.

La CIE ha adoptado diferentes espacios desde 1960 basados en transformaciones del XYZ, como pueden ser el CIE-L*a*b*, SVF (Seim, Valberg, 1986), DIN99 (Cui, et al., 2002) y CIECAM02 (CIE 159:2004), espacios de color que van a ser tratados en este trabajo. Hoy en día, el espacio más utilizado en gran número de aplicaciones científicas e industriales es el CIE-L*a*b* (CIE 15:2004), pero debido a que no es totalmente uniforme trabajamos en los otros espacios de color citados anteriormente, que son perceptualmente más uniformes (Ver anexo).

Como hemos visto, un color se describe mediante una terna de parámetros, por lo que todos los colores distinguibles por el ojo humano se encuentran formando una estructura tridimensional denominada *sólido de color*. En los vértices de dicho sólido de color se encuentran respectivamente el blanco y el negro perceptual, o absoluto. Los colores que forman la frontera o límite del sólido, son colores de máximo colorido, y son denominados *colores óptimos*, que estudiaremos más detalladamente en el próximo apartado (Figura 7), (Wyszecki, 1982; Kuehni, 2003). La forma del sólido de color depende tanto del iluminante como del espacio de color en el que se trabaje.

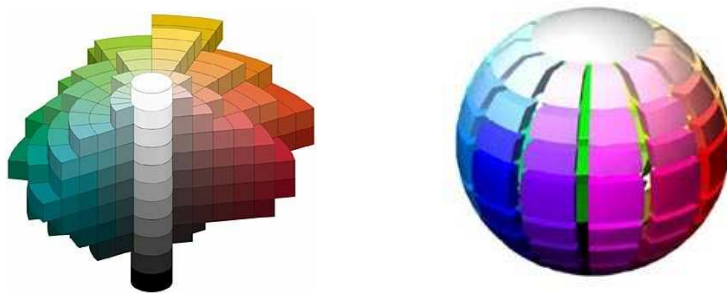


Figura 7. Representación del sólido de color de forma artística.

1.1.1. Visión deficiente del color en humanos

Hasta ahora hemos visto los fundamentos o principios de la Visión del Color para un observador normal, siendo el hecho más destacado que la percepción del color depende de tres tipos de "detectores": los conos L, M y S. Pero también podemos encontrarnos observadores con una visión del color deficiente (Mollon, Pokornoy, Knoblauch, 2003). Las alteraciones en la percepción cromática se denominan *discromatopsias* (Foster, 1991; Urtubia, 1997). Algunos individuos son incapaces de percibir de forma absoluta un determinado conjunto de colores, mientras que otros sólo muestran ciertas dificultades para reconocerlos. Las alteraciones pueden deberse a la total inactivación de un fotopigmento determinado, que es lo que se conoce como deficiencia cromática severa, o bien a una alteración en el máximo de absorción de dicho fotopigmento, conocido como anomalía cromática. Si los tres conos carecen de fotopigmentos, el observador no tiene visión del color, se habla entonces de acromatopsia (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de las anomalías visuales. En los anómalos L', M', S' indica cual de los tres fotopigmentos es anormal.

TIPO DE VISIÓN	COMPORTAMIENTO COLORIMÉTRICO	DENOMINACIÓN	TIPO DEFICIENCIA
ANÓMALA	TRICRÓMATA ANOMALO	PROTANOMALOS	L' M S
		DEUTERANOMALOS	L M' S
		TRITANOMALOS	L M S'
DEFECTIVA	DICRÓMATA	PROTANOPE	_ M S
		DEUTERANOPE	L _ S
		TRITANOPE	L M _
	MONOCRÓMATA	MONOCRÓMATA	_ _ S
	ACRÓMATA	ACRÓMATA	_ _ _

Los monocrómatas y acrómatas únicamente son capaces de percibir diferencias de intensidad, es decir, diferencias de luminancia. Su visión cromática se reduce a una escala de luminosidad: grises con límites en el blanco y en el negro. Ambos observadores son similares en cuanto a su visión cromática, sin embargo, los acrómatas, al no disponer de conos, no tienen visión central (hay un número muy bajo de bastones en la fovea) y, como consecuencia, presentan problemas adicionales de baja agudeza visual, nistagmo y fotofobia aguda (los bastones se saturan y dejan de dar respuesta en cuanto aumenta la luminosidad por encima de 10 cd/m^2).

Si los receptores que faltan son los conos L se llama al individuo protanope y si le falta el receptor M se le llama deuteranope. Debido a este cambio de receptores, los cambios cromáticos sufren variaciones, en concreto, en el caso de los deuteranopes son menos sensibles al verde y los protanopes son menos sensibles al rojo. Los deuteranopes son de apariencia normal mientras que los protanopes son menos sensibles a la luz ya que les falta el cono L que proporciona el doble de señal en el canal de intensidad luminosa.

Los tritanopes tienen deficiencia severa para el azul debido a la ausencia de conos S, para ellos por ejemplo, un cielo azul claro será verde brillante.

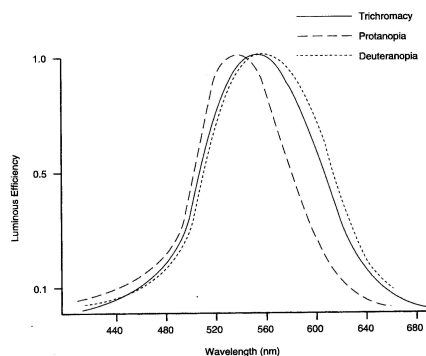


Figura 8. Curvas de sensibilidad, $V(\lambda)$, para un tricrómatas normal, protanope o deuteranope.

Los protanómalos, deuteranómalos y tritanómalos, como se ve reflejado en la tabla, poseen los tres tipos de conos, si bien alguno de ellos no funciona correctamente, es decir, el pico máximo de absorción está desplazado respecto al pico de un observador normal. Estos individuos no aceptan las mezclas de colores ajustadas para los tricrómatas normales, teniendo una percepción del color distinta a la que tienen dichos observadores.

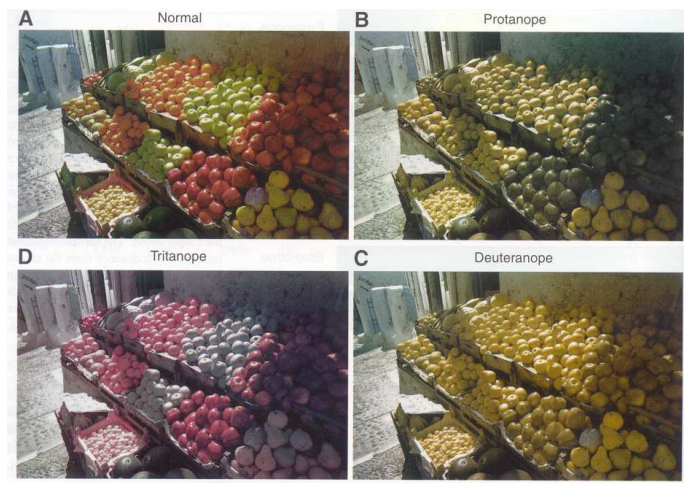


Figura 9. Visión de la misma imagen por defectivos cromáticos.

1.1.2. Visión del color en los animales

De la misma manera que estamos hablando de la visión del color humana, podemos extender el estudio a la visión de diferentes animales. Actualmente se sabe con certeza que no todos los animales tienen la capacidad de poder distinguir los colores; hay muchos que poseen una magnífica visión, pero todo lo ven en blanco y negro o en tonos de gris; hay otros que tan sólo distinguen el bulto de los objetos; otros, únicamente pueden percibir los cambios de intensidad de la luz, otros que son totalmente ciegos, y algunos si que presentan visión del color.

Como ocurre en el ojo humano, el sistema visual animal está constituido por diferentes tipos de fotorreceptores sensibles a la energía radiante, la luz, y que implica que tengan una percepción visual u otra. Si conociésemos las sensibilidades espectrales de los fotorreceptores de distintas especies animales sería sencillo estudiar la visión del color en cada una de ellas. Los datos disponibles sobre los pigmentos visuales así como de las sensibilidades espectrales de fotorreceptores están aumentando, principalmente gracias a dos técnicas: la microespectrofotometría (MSP) y la genética molecular (Tabla 2).

La microespectrofotometría es una técnica analítica que estudia las sustancias presentes en las enzimas de células individuales (*in situ*), mediante la medida de la absorción de la luz. La luz procede de una lámpara de filamento de tungsteno o una lámpara de arco de xenón dispersada por un monocromador que ilumina el sistema óptico de un microscopio.

La genética molecular es el campo de la biología que estudia la estructura y la función de los genes a nivel molecular, empleando los métodos de la genética y la biología molecular. Es posible usar la información molecular para determinar las sensibilidades espectrales de los fotorreceptores del sistema visual de diferentes especies de animales.

Son muchos los científicos que están utilizando estas técnicas, para conocer las sensibilidades espectrales de los fotorreceptores, por lo que será posible disponer de datos que nos permitan realizar un estudio sobre la visión del color de diferentes animales.

El número de fotorreceptores depende de la especie animal que se considere (Kelber, Vorobver, Osorio, 2003). Para algunos invertebrados encontramos especies con únicamente un tipo de fotorreceptor, otras con dos o tres fotorreceptores, pero también encontramos especies que presentan cinco o más fotorreceptores.

Tabla 2. Ejemplos de diferentes receptores para distintas especies animales. Se indica el método usado para determinar las sensibilidades espectrales; E: registro electrofisiológico, ERG: electroretinograma, MSP: microespectrofotometría. (Extraída de Kelber, Vorobver, Osorio, 2004)

Grupo Animal	Método	Sensibilidad máxima (nm)			
Moluscos					
Pulpo	E	470			
Calamar luciérnaga	MSP	470	485	500	
Arañas					
Araña saltadora 1	E	360	520		
Araña saltadora 2	E	360	490	520	580
Crutáceos					
Pulga de agua	E	348	434	525	608
Camarón	E/MSP	12+ (Desde 315 a 654 nm)			
Isópodo	E	340	470	520	
Insectos					
Libélula	E	330	430	490	520 620
Mosca doméstica	E	335	355	460	490 530
Abeja	E	344	436	556	
Mariposa	E	360	400	440	520 600
Vertebrados		Bastones VS S M L			
Lamprea	MSP	515	555		
Esturión	MSP	549	465	549	613
Pez oro(Goldfish)	MSP / E	522	356	447	537 623
Anfibios					
Rana	MSP / ERG	430	?	431	502 562
Salamandra	E	506	400	444	610

Ya hemos hablado anteriormente de la definición de color, como la sensación que depende de la longitud de onda (λ) del estímulo. Esta definición implica un acto consciente del sujeto, por lo que en visión animal el problema es encontrar un modelo perceptual del color, que nos permita hablar de variables perceptuales, como el tono, croma y claridad. Para establecer un modelo de este tipo se tiene que tener en cuenta la parte psicofísica de la percepción del color, siendo necesario un entrenamiento específico de los animales para conocer su respuesta frente a varios estímulos.

Sin embargo, podemos centrarnos en la descripción física del color mediante magnitudes medibles, lo que nos va a permitir hablar de discriminación de colores aunque esto no implique una visión del color del mismo nivel que la del observador humano normal. En la mayoría de los casos los animales con más de un fotorreceptor tienen visión del color, hecho que además se puede probar mediante diferentes métodos sin necesidad de conocer las sensibilidades espectrales.

De la misma forma que para los humanos un color puede igualarse con la combinación de tres primarios y puede representarse en un espacio tridimensional, para los animales (Kelber, Varobver, Osorio, 2004) un color puede definirse a partir de la combinación de n primarios, siendo n el número de fotorreceptores que tenga su sistema visual y así podrá representarse un color dado en un espacio de color *n-dimensional* (Figura 10).

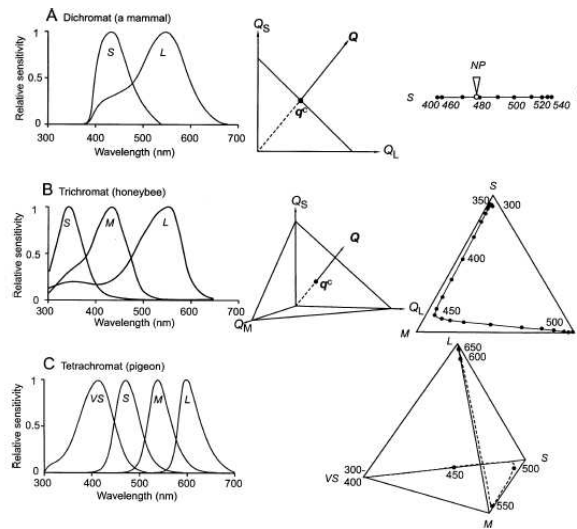


Figura 10. Sensibilidades relativas de los fotorreceptores (izquierda), espacios de color asociados a esos fotorreceptores (centro), y diagrama cromático (derecha).

1.2. Definición de color óptimo (sólido de color)

Ya hemos visto que la percepción humana del color es esencialmente trivariante, por lo que todos los colores se distribuyen en un sólido tridimensional, denominado sólido de color (Figura 7). Los colores que forman las fronteras de dicho sólido son denominados colores óptimos y fueron estudiados exhaustivamente por MacAdam en 1935, siguiendo el trabajo desarrollado por E. Schrödinger (Schrödinger, 1920) y Rösch (Rösch, 1929) quienes desarrollaron una primera teoría de los estímulos-color óptimos. Por eso los límites del sólido de color, también llamado sólido de Rösch-MacAdam, se les denominan límites de MacAdam.

Los colores óptimos son aquellos que tienen colorido máximo para un factor de luminancia (Y) dado. Los estudios iniciales de Schrödinger y Rösch pueden resumirse en este teorema: *"la máxima pureza posible para un material, de una longitud de onda*

específica y una eficiencia visual dada, puede obtenerse si la curva espectrofotométrica tiene como valores posibles cero o la unidad, donde únicamente puede haber dos transiciones entre estos dos valores en todo el espectro visible". MacAdam, en 1935, demostró este teorema (MacAdam, 1935), asumiendo una equivalencia entre este problema y el cálculo de centros de gravedad de una mezcla aditiva de colores.

Se pueden distinguir por tanto, dos tipos de colores óptimos: tipo 1 o "montaña" y tipo 2 o "valle". La Figura 11 muestra varios ejemplos de los dos tipos de color óptimo que comparten el mismo factor de luminancia (Y) bajo el iluminante equienergético E y el observador patrón CIE-1931 XYZ.

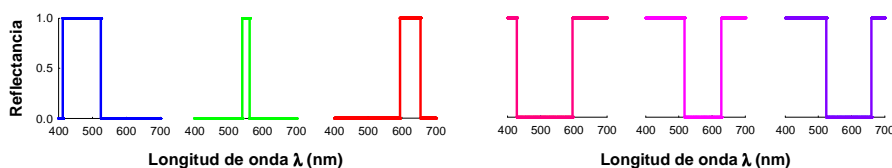


Figura 11. Seis ejemplos de colores óptimos (izquierda: tipo 1; derecha: tipo 2) que poseen el factor de luminancia $Y=20$ bajo el iluminante equienergético E y el observador patrón CIE-1931 XYZ. Las longitudes de onda de transición λ_1 y λ_2 son, de izquierda a derecha, las siguientes: 412.1 – 525.2 nm, 540 – 562.0 nm, 594.0 – 654.7, 428.0 – 596.0 nm, 517.1 – 628.0 nm y 524 – 660.1 nm

Los colores óptimos no existen realmente, es decir, no pueden encontrarse en la naturaleza ni pueden conseguirse mediante formulación de colorantes; sin embargo, sirven para delimitar el sólido de color de la percepción humana y valorar la calidad de los colorantes: si los colorantes se acercan a los límites de MacAdam, mayor gama de colores reproducibles se puede conseguir. De esta forma se puede realizar una comparativa sencilla, pero no exhaustiva, de la gama de colores reproducibles con los colorantes disponibles y los límites de MacAdam, como ya hizo Pointer en 1980 (Pointer, 1980), al realizar una comparativa entre distintas gamas

de colores industriales de esa época utilizando los límites de MacAdam.

MacAdam calculó el locus cromático de los colores óptimos en función del factor de luminancia Y , para un observador de 2° , y para los iluminantes A, C y D65 (Berns, 2000; Kuehni, 2003).

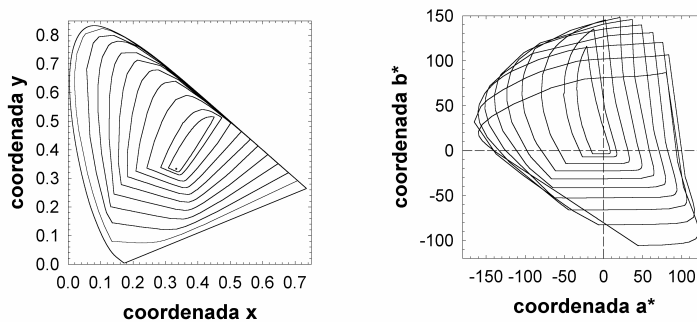


Figura 12. Límites de MacAdam bajo el iluminante E en los diagramas cromáticos CIE-xy (izquierda) y CIE-a*b* (derecha). De los locus o las fronteras más externas hacia las más interiores se va “escalando” progresivamente según el factor de luminancia $Y = \{10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95\}$.

Para la obtención de los colores óptimos se asume que el espectro de estos colores únicamente tiene dos valores, cero y la unidad, existiendo dos posibles saltos entre estos valores tal como demostró MacAdam. Además, el cálculo de colores óptimos es posible debido a que el espacio de representación del color es un espacio vectorial, como puede deducirse a partir de la teoría tricromática expuesta anteriormente. Si tenemos los colores primarios P_i y los valores triestímulo correspondientes que caracterizan un estímulo-color dado y se denota con $Y_C(P_i)$ a las luminancias de los primarios, se tiene que se cumplen las siguientes propiedades: (Capilla, Artigas, Pujol, 2002)

- Si C_1 y C_2 están caracterizados, respectivamente, por las ternas $Y_{C1}(P_i)$ y $Y_{C2}(P_i)$, los dos colores serán metámeros si y solo si $Y_{C1}(P_i) = Y_{C2}(P_i)$, $\forall i$

- Si C_1 y C_2 están caracterizados, respectivamente, por las ternas $Y_{C1}(P_i)$ y $Y_{C2}(P_i)$, el color obtenido como mezcla de ambos se caracteriza mediante $Y_{C1}(P_i) + Y_{C2}(P_i)$.
- Si C_1 está caracterizado por la terna $Y_{C1}(P_i)$, el estímulo resultante de variar la luminancia de C_1 por un factor α , vendrá caracterizado por la terna $\alpha Y_{C1}(P_i)$.
- Si $Y(C)$ es la luminancia del color C , entonces:

$$Y(C) = \sum_{i=1}^3 Y_C(P_i) \quad (8)$$

Como puede verse la segunda y tercera propiedad son análogas a las propiedades de linealidad de los vectores, por lo que las ternas $Y_C(P_i)$ definen un espacio vectorial de representación.

Evaluamos ahora la posibilidad de extender el cálculo de colores óptimos para otros observadores (animales, observadores anómalos) y diferentes dispositivos de captura de imágenes

Para dispositivos de captura (escáneres y cámaras) el planteamiento es idéntico ya que en estos dispositivos también se trabaja con la teoría tricromática de la percepción del color. Al disponer de sensibilidades espectrales correspondientes a cada canal se trabaja en un espacio vectorial de representación, cumpliéndose las propiedades de linealidad. Además, los colores óptimos cumplirán las mismas condiciones que para visión humana normal: su espectro será tipo montaña o valle, con la diferencia que en lugar del espacio XYZ se utilizará su propio espacio de representación, que podemos denotar como RGB.

De la misma forma se puede realizar el cálculo de colores óptimos para visión animal, ya que se parte también de la teoría cromática definiendo un espacio vectorial de representación del color asociado a las sensibilidades espectrales correspondiente a los fotorreceptores del sistema visual animal a estudiar.

Para visión humana deficiente será necesario realizar dos argumentos distintos. Para el caso de los tricrómatas anómalos las consideraciones realizadas hasta ahora seguirán siendo válidas, existen tres tipos de conos cuya diferencia con los tricrómatas normales se encuentra en que los picos de máxima absorción están desplazados respecto a los otros, por lo que se partirá de sensibilidades espectrales diferentes. Al realizar el cálculo de los colores óptimos se deberán exigir las mismas condiciones y se obtendrán sólidos de color cuya forma difiere a la de los tricrómatas normales, pudiendo realizar entonces un análisis que nos permita cualificar las diferencias entre ambos observadores.

Hemos dicho que en colorimetría estándar un estímulo-color dado viene caracterizado por una terna de números, hablando entonces de sólido de color. Pero si centramos nuestro análisis en observadores dicrómatas, es decir, con ausencia de uno de los tres tipos de conos, tenemos que ahora un estímulo-color estará caracterizado únicamente por dos números, pasando de un sólido de color tridimensional a un diagrama cromático (Figura 13, derecha).

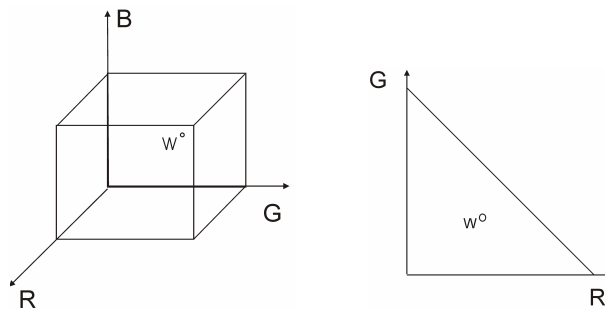


Figura 13. Espacios de color para un tricrómata (izquierda) y un dicrómata tipo tritán (derecha)

Intuimos que los colores óptimos obtenidos no se encontrarán sobre los bordes de las figuras representadas en la Figura 13. Los bordes delimitan una gama de color teórica, que no tiene por qué

necesariamente corresponderse a una gama de color físicamente posible. Tanto en el espacio CIE-XYZ como en cualquier otro espacio de color característico de cualquier dispositivo de captura o de cualquier especie animal (RGB), puede ocurrir que el espectro asociado al estímulo-color, cuyos valores triestímulo son positivos, no sea espectralmente positivo, es decir no corresponda a un color real. De ahí la importancia de los colores óptimos porque son realmente los que delimitan la gama de colores reales.

1.3. Tecnologías de reproducción del color

La Tecnología del color es el estudio de las teorías y de las técnicas aplicadas al diseño, a la fabricación y a la medida de objetos coloreados.

1.3.1. *Principios de reproducción del color*

Cuando hablamos de Tecnología del color se hace referencia, habitualmente, al tratamiento del color de una escena o imagen, por lo que lo primero que debemos abordar son los distintos métodos de reproducción del color. Existen dos métodos de reproducción, (Berns, 2000; Capilla, Artigas, Pujol, 2002) el método aditivo y el método sustractivo, aunque también podemos tener dispositivos que combinen ambos métodos, lo que se conoce como método híbrido.

El método aditivo fue demostrado por James Clerk Maxwell (Hunt, 2006) en 1862 y se basaba en el hecho de que todos los colores se pueden conseguir por la mezcla de los colores primarios rojo, verde y azul. Así, si se obtienen tres negativos con sus respectivos filtros rojo, verde y azul y se proyecta sobre la misma

pantalla, cada uno con sus filtros correspondientes, se forma una imagen única con todas las tonalidades del modelo original.

En el método aditivo los colores primarios mezclados en proporciones iguales producen blanco, mientras que las sumas binarias B+G, G+R y R+B resultan ser cian (C), amarillo (Y) y magenta (M), respectivamente. En este método el sustrato siempre será un fondo negro puesto que la mezcla de los tres colores produce blanco. De esta forma se tiene que el primario R controla la emisión en la banda R, el primario G la emisión en la banda G y el primario B controla la emisión en la banda B.

En el método sustractivo se toman como colores primarios el cian, amarillo y magenta, que controlan de forma selectiva, por absorción, la cantidad de luz RGB que incide sobre nuestros ojos. En este caso el soporte o sustrato siempre será blanco.



Figura 14. Primarios del método aditivo (izquierda) y del método sustractivo (derecha).

Si nos centramos en el método aditivo, existen cinco formas diferentes de mezclar las luces roja, verde y azul, por lo que distinguimos cinco métodos aditivos: el método por parpadeo, método por mosaico, método lenticular, método de imagen virtual y método por difracción (Hunt, 2006; Martínez-Verdú, 2002).

Volvamos ahora al método sustractivo. Este método de reproducción del color, a primera vista, parece diferente al método aditivo, ya que todos los colores son reproducidos por diferentes proporciones de los primarios cian, magenta y amarillo. Sin

embargo ambos métodos difieren sólo en la forma no en el principio.

Para controlar el método sustractivo de reproducción del color es necesario controlar las concentraciones de los tres colorantes independientes de cada punto de la transparencia o papel. El principio sustractivo consiste en variar las concentraciones de tinta cian, amarillo y magenta, con el fin de controlar las intensidades de rojo, verde y azul de la luz blanca, y además producir de este modo un amplio rango de colores de distintas intensidades. Aunque los colores de las tintas usados son cian, magenta y amarillo, esto es solamente secundario ya que se eligen éstas debido a que son sustancias que absorben longitudes de ondas largas, medias y cortas, es decir, rojo, verde y azul respectivamente.

El objetivo principal de la reproducción del color es controlar la terna de luces RGB de una copia de una escena mediante procedimientos aditivos o sustractivos, para que se asemejen lo mejor posible a los valores originales de la escena. Teniendo en cuenta esto, podemos definir:

- reproducción espectral: se consigue la igualdad de reflectancias $\rho(\lambda)$ o distribuciones espectrales de potencia radiante $C(\lambda)$.
- reproducción exacta: igualdad de los valores triestímulo T_{XYZ} en cd/m^2 , que asegura también la igualdad en la apariencia del color.
- reproducción colorimétrica: igualdad de los valores triestímulo relativos T'_{XYZ} , que no asegura la igualdad en la apariencia del color.
- reproducción equivalente: aproximación de los valores triestímulo relativos T'_{XYZ} tal que aseguran la igualdad de apariencia bajo ciertas condiciones.

- reproducción preferida: la igualdad se consigue según criterios psicológicos y culturales.

Otro método básico de reproducción es el método híbrido (Kipphan, 2001; Smyth, 2003; Field, 2004), método que combina los métodos aditivo y sustractivo, descritos anteriormente, este método se utiliza por ejemplo en fotografía digital (artes gráficas). La cámara digital trabaja con el método aditivo, pero al pasar la imagen a papel es necesario tener en cuenta el método sustractivo. En la siguiente figura se muestra un esquema básico del proceso de reproducción del color en fotografía digital.

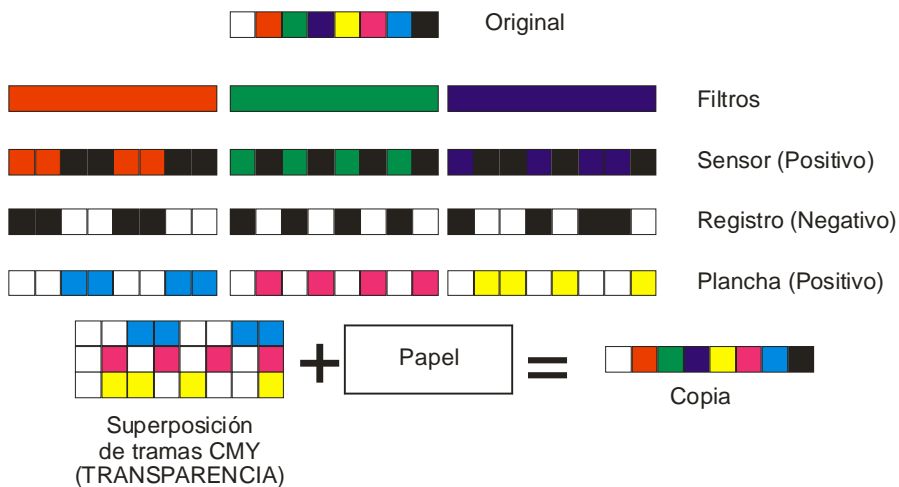


Figura 15. Esquema reproducción del color mediante el método híbrido.

1.3.2. Química del color

Hasta ahora hemos hecho una descripción física del color, pero ahora vamos a describir algunos principios químicos fundamentales asociados con los compuestos coloreados. El color se incorpora a los objetos por medio de sustancias denominadas tintes y pigmentos. Es importante la reproducción del color mediante pigmentos o colorantes, ya que es el caso más usual en la industria, como por ejemplo en textil, pintura, papelera, etc.

La diferencia esencial entre estos dos tipos de colorantes es que los tintes son compuestos solubles, que son aplicados principalmente a materiales textiles en una disolución acuosa, mientras que los pigmentos son compuestos insolubles, incorporados mediante un proceso de dispersión en productos tales como las pinturas, las tintas de imprenta y los plásticos.

Los colorantes pueden ser clasificados según su estructura química o por el método de aplicación. Según el método de clasificación química, los colorantes se agrupan de acuerdo con ciertas características estructurales químicas comunes, aunque para el tintorero es de mayor importancia la clasificación según el método de aplicación. Las moléculas de los tintes y pigmentos son diseñadas para asegurar que presenten un conjunto de propiedades adecuadas para una aplicación concreta.

El requisito más evidente para que un tinte o pigmento sea útil en sus aplicaciones es que debe tener un color adecuado. Los dos modos más importantes en los que la luz puede interaccionar con los objetos, desde el punto de vista de su influencia en el color, son la absorción y la difusión. La absorción es el proceso por el cual la energía radiante se utiliza para excitar las moléculas en el objeto a estados de energía superiores. La difusión es la interacción por la cual la luz es redirigida como consecuencia de refracciones y reflexiones múltiples. En general, cuando en la interacción de la luz con un objeto sólo interviene la absorción, éste será transparente ya que la luz no es absorbida sino transmitida a través del objeto. Si hay centros de difusión, el objeto aparecerá o bien translúcido o bien opaco, dependiendo del grado de difusión, según la luz es reflejada hacia el observador.

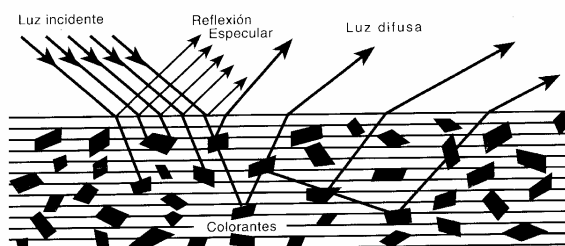


Figura 16. Tipos de interacción de la luz con la materia: la reflexión especular (brillo) no aporta color del propio objeto, y sí de la lámpara; la luz difusa, que ha penetrado y ha interactuado con la materia, ya sea por difusión o absorción, es la que informa sobre el color del objeto.

El tipo de reproducción mediante colorantes se basa en el método sustractivo, aunque cada caso de reproducción es único al intervenir en dicho proceso diferentes factores como la determinación de los colorantes, el sustrato utilizado, el espesor de la capa, etc. Pero bajo ciertas restricciones es posible desarrollar un método que caracterice los colorantes y el sustrato empleado mediante unas constantes medibles experimentalmente y nos permita a su vez deducir las concentraciones de cada uno de los colorantes para igualar un color determinado, este proceso se conoce como “formulación de colorantes”. Para todo esto, una de las teorías más conocidas y más utilizadas en la actualidad en la formulación de colorantes, es la teoría de Kubelka-Munk (Völz, 2001; McDonald, 1997) que nos permite caracterizar los colorantes y sustratos para poder predecir el color de una mezcla.

En los últimos años han aparecido nuevos colorantes, los denominados colorantes especiales, para cubrir ciertas demandas industriales. Entre estos colorantes destacan los colorantes fluorescentes, metalizados y perlados, por lo que vamos a describir brevemente el efecto que provocan.

Cuando vemos un color fluorescente (Schieber, 2001; www.specialchem4coatings.com), parece como si tuviera luz propia aunque no es realmente una fuente de luz. Cuando se aplica una luz a un material fluorescente, los rayos UV son absorbidos y emitidos

de nuevo como una luz visible en otras regiones del espectro, normalmente en longitudes de onda más largas. Por ejemplo, cuando una radiación de 360 nm es absorbida y emitida a 420 nm, el valor de energía reflejada a 420 nm puede rebasar el 100%. Al poder verse una cantidad de luz superior a la esperada, al ojo humano le parece como si el material emitiera luz por sí mismo.

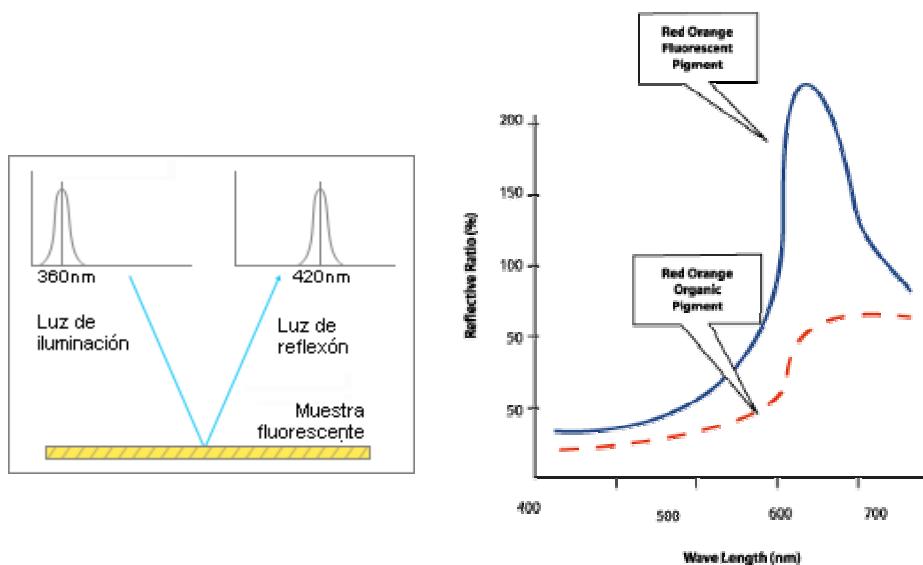


Figura 17. Comportamiento de una muestra fluorescente.

Para la medición de muestras no fluorescentes, el elemento dispersor puede colocarse o bien entre la fuente y la muestra o bien entre la muestra y el receptor. Sin embargo, para la medición de muestras fluorescentes, para coincidir con el color según lo ve el observador, el elemento dispersor deberá colocarse entre la muestra y el detector de modo que la muestra sea iluminada por el espectro completo de la fuente. Cuando se mida un color fluorescente mediante un espectrofotómetro, deberá controlarse la distribución de potencia espectral de la fuente de luz, incluyendo las regiones ultravioleta, por lo que necesitaremos un espectrofotómetro que tenga en cuenta estos factores, es decir un espectrofotómetro de doble monocromador.

Una pintura metalizada (Wheeler, 1999; Mittal, 1998), contiene pigmentos transparentes coloreados dispersos en el medio ligante (nitrocelulósico, acrílico o acrílico-uretano); la transparencia del acabado produce un efecto visual de profundidad. El cubrimiento y el efecto metálico se consiguen con pequeñas laminillas de aluminio pulido que reflejan la luz como un espejo. Según el efecto visual deseado se escoge el tamaño de las láminas o "granos": fino, medio, medio-grueso y extra-grueso. Cuando los rayos de luz llegan a la capa de pintura metalizada, las láminas de aluminio los reflejan produciendo en el observador la sensación de efecto metálico cuando se mira la aplicación de frente. Si se observa de lado el color aparece más oscuro. La diferencia de color según el ángulo de observación es más notoria si las partículas de aluminio están bien organizadas horizontalmente. Cuando las partículas de aluminio están desorganizadas (unas horizontales y otras inclinadas) el acabado metálico es irregular por la forma como se refleja la luz; así unas zonas presentan más brillo y efecto metálico que las demás. En la Figura 18 se ilustra cómo interactúan la reflectancia especular y la reflectancia difusa con una pintura metalizada, propiedad óptica en la que se basan estos pigmentos.

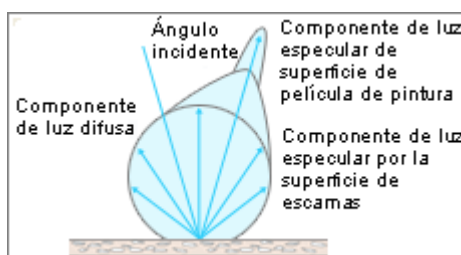


Figura 18. Comportamiento de una muestra metalizada.

Además de estos colores metálicos, también podemos hablar de colores o pigmentos perlados. Los pigmentos perlados se caracterizan por estar formados de delgadas láminas de mica recubiertas de dióxido de titanio. Cuando la luz blanca incide sobre

el pigmento, parte se refleja y otra se transmite a través de la capa de dióxido hasta que se encuentra con la lámina de mica, donde otra vez vuelve a reflejarse. Esta componente reflejada emerge del pigmento paralela al primer rayo reflejado y en fase con ésta. Como consecuencia, la onda resultante será más intensa y además se producirán cambios en la tonalidad del pigmento. Estos cambios dependerán del espesor de la capa de dióxido de titanio, del índice de refracción y del ángulo de iluminación. Por ejemplo, según aumenta el espesor, el color puede pasar de un blanco-plata hasta un amarillo, rojo y azul, y hasta un verde.

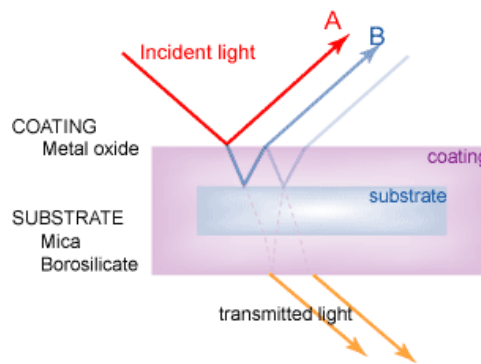


Figura 19. Comportamiento de un pigmento perlado.

Aunque las pinturas de colores perlados no tienen pigmentos metálicos producen acabados similares a los metalizados sin los inconvenientes propios de estos, porque su naturaleza inerte no se afecta con soluciones ácidas o alcalinas y no generan gases.

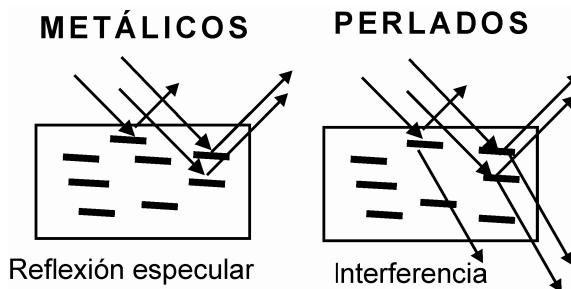


Figura 20. Diferencia entre pigmentos metálicos y perlados.

1.3.3. Métodos sustractivos clásicos

En la reproducción del color con colorantes podemos aplicar dos teorías ópticas distintas dependiendo del medio, la ley de Bouguer-Beer para medios transparentes y la ley de Kubelka-Munk para medios translúcidos y opacos (McDonald, 1997; Berns, 2000; Völz, 2001; Emmel, 2003)

En el caso de medios transparentes, las propiedades espectrales de cada colorante son escalables y dado un único colorante podemos conseguir colores distintos variando la concentración de dicho colorante o la anchura de la capa aplicada de colorante. Ya Bouguer en 1729 encontró una relación lineal entre la densidad óptica y la anchura de la capa de colorante; podemos decir entonces que la densidad óptica es proporcional al grosor de la capa. Cien años más tarde, aproximadamente, Beer encontró un principio parecido que describía la relación entre la densidad óptica y la concentración del colorante, encontrando también una relación lineal entre ambos (Berns, 2000; Gilabert, 2002).

A dicha constante de proporcionalidad se le denomina absorptividad, $\alpha(\lambda)$, siendo un parámetro intrínseco del colorante, podemos escribir la ley de Bouguer-Beer como:

$$D(\lambda) = \alpha(\lambda) c e \quad (9)$$

donde:

$D(\lambda)$ = densidad óptica (o absorbancia)

$\alpha(\lambda)$ = absorptividad,

c = concentración,

e = espesor.

La transmitancia interna del material, es decir la transmitancia sin tener en cuenta la reflexión especular de la superficie debido al cambio del índice de refracción, puede calcularse como:

$$\tau_{\text{int}}(\lambda) = 10^{-D(\lambda)} \quad (10)$$

Nuestro objetivo es conocer las concentraciones y grosores de los colorantes aplicados en un material para que dada una muestra de partida, a la que llamaremos “estándar”, tengamos que $T_{XYZ}(\text{copia}) = T_{XYZ}(\text{std})$. Aplicando la ley de Bouguer-Beer ya podríamos realizar dicho cálculo. Dada la muestra a reproducir, mediremos su transmitancia $\tau(\lambda)$ con un espectrofotómetro, después calcularemos la transmitancia interna $\tau_{\text{int}}(\lambda)$, considerando la ecuación 11:

$$\tau(\lambda) = \frac{(1 - K_1)^2 \tau_{\text{int}}(\lambda)}{1 - [K_1 \tau_{\text{int}}(\lambda)]^2} \quad (11)$$

siendo K_1 el factor de reflexión de Fresnel de la primera capa, calculado como:

$$K_1 = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad n = \text{índice de refracción} \quad (12)$$

Si calculamos la densidad óptica de la muestra, mezcla de diferentes colorantes, como la suma de las densidades ópticas de cada componente (según la ley de Bouguer-Beer) llegamos a un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas son las concentraciones y grosores de cada uno de los colorantes que hay en la muestra ya que, debemos exigir que la densidad óptica de la muestra copia debe ser igual a la densidad óptica de la muestra estándar.

$$D_{\text{mix}}(\lambda) = D_1(\lambda) + D_2(\lambda) + \dots + D_{\text{sust}}(\lambda) \quad (13)$$

$$D_{\text{mix}} = \alpha_1(\lambda)c_1 + \alpha_2(\lambda)c_2 + \dots + D_{\text{sust}}(\lambda)$$

donde $D_{\text{sust}}(\lambda)$ es la contribución del material o sustrato a la mezcla.

Si escribimos de forma matricial:

$$D_{std} = A \cdot c \cdot D_{sust} \quad c = \begin{bmatrix} (ec)_1 \\ (ec)_2 \\ \vdots \\ (ec)_m \end{bmatrix} = A^+(D_{std} - D_{sust})$$

siendo:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1(\lambda_1) & \alpha_2(\lambda_1) & \dots & \alpha_m(\lambda_1) \\ \alpha_1(\lambda_2) & \alpha_2(\lambda_2) & \dots & \alpha_m(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_1(\lambda_n) & \alpha_2(\lambda_n) & \dots & \alpha_m(\lambda_n) \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (14)$$

$$D_{std} = \begin{bmatrix} D_{std}(\lambda_1) \\ D_{std}(\lambda_2) \\ \vdots \\ D_{std}(\lambda_n) \end{bmatrix}_{1 \times n} \quad D_{sust} = \begin{bmatrix} D_{sust}(\lambda_1) \\ D_{sust}(\lambda_2) \\ \vdots \\ D_{sust}(\lambda_n) \end{bmatrix}_{1 \times n}$$

Pero el caso más general es tener colorantes que reflejan parte de la luz que les llega y que también absorban parte de esa luz, aplicando entonces la teoría de Kubelka-Munk al tratarse de medios translúcidos u opacos. Esta teoría es un intento de relacionar las propiedades de la reflectancia espectral de una sustancia con su constitución y se usa sobre todo en la predicción de resultados en la obtención de colorantes (tintes o pigmentos) en términos de sus coeficientes de absorción y dispersión. La reflectancia espectral es, por tanto en estos casos, el resultado de la absorción (K) y la dispersión (S) de la luz por parte de los colorantes.

Kubelka y Munk consideraron una capa de colorante translúcido sobre un fondo opaco. Dentro de la capa de colorante, se da tanto el proceso de absorción como el de difusión. Sabemos que la luz viaja en muchas direcciones en la capa de colorante, pero estos autores hicieron una simplificación y asumieron únicamente dos direcciones, una opuesta a la otra.



Figura 21. Las dos direcciones asumidas en la teoría de Kubelka-Munk en una capa de material.

Como la reflectancia espectral $\rho(\lambda)$ no era una combinación lineal de la concentración, definieron un nuevo parámetro que fuera lineal con la concentración, al que denominaron función K-M, de forma análoga al parámetro absorptividad, $D(\lambda)$, de la ley de Bouguer-Beer.

Resolviendo un par de ecuaciones diferenciales, relacionado con los flujos de energía entrante y saliente, llegaron a una ecuación que predice la reflectancia interna a partir de la reflectancia del fondo y las propiedades de absorción y difusión de la capa de colorante, además de la anchura de dicha capa.

$$\forall \quad \lambda : \begin{cases} \frac{dI}{dx} = -(K + S)I + SJ \\ \frac{dJ}{dx} = (K + S)J - SI \end{cases} \quad (15)$$

$$\rho_x = \frac{J_x}{I_x}, \quad \left. \frac{d\rho}{dx} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0$$

$$\forall \lambda : \rho_{int} \equiv \rho_{\infty} = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\left(1 + \frac{K}{S}\right)^2 - 1} \quad (16)$$

$$\forall \lambda : f(\rho) = \frac{(1 - \rho_{\infty})^2}{2\rho_{\infty}} \quad \text{función } K - M$$

En plásticos y pinturas se aplica la ley de Kubelka-Munk con dos constantes tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} K_{mix}(\lambda) &= k_1(\lambda)c_1 + k_2(\lambda)c_2 + \dots + k_N(\lambda)c_N + K_{sust}(\lambda) \\ S_{mix}(\lambda) &= s_1(\lambda)c_1 + s_2(\lambda)c_2 + \dots + s_N(\lambda)c_N + S_{sust}(\lambda) \\ \Rightarrow \forall \lambda : \left(\frac{K}{S}\right)_{mix} &= \frac{k_1 c_1 + \dots + k_N c_N + K_{sust}}{s_1 c_1 + \dots + s_N c_N + S_{sust}} \\ \Rightarrow \forall \lambda : \rho_{int} &= 1 + \left(\frac{K}{S}\right)_{mix} - \sqrt{\left(1 + \left(\frac{K}{S}\right)_{mix}\right)^2 - 1} \\ \Rightarrow \forall \lambda : \rho_m &= K_1 + \frac{(1 - K_1)(1 - K_2)\rho_{int}}{1 - K_2 \rho_{int}}, \\ \text{geometrías } d / 0 \text{ spinc} &\rightarrow \text{CIE} - XYZ \end{aligned} \quad (17)$$

Para el caso de tintes empleados, por ejemplo, en fibras textiles, papel... se aplica la ley de Kubelka-Munk pero con una única constante:

$$\begin{aligned}
 K_{mix}(\lambda) &= k_1(\lambda)c_1 + k_2(\lambda)c_2 + \dots + k_N(\lambda)c_N + K_{sust}(\lambda) \\
 S_{mix}(\lambda) &= S_{sust}(\lambda) \\
 \Rightarrow \forall \lambda : \left(\frac{K}{S}\right)_{mix} &= \frac{k_1 c_1 + \dots + k_N c_N + K_{sust}}{S_{sust}} = \\
 &= \left(\frac{k}{s}\right)_1 c_1 + \dots + \left(\frac{k}{s}\right)_N c_N + \left(\frac{K}{S}\right)_{sust} \\
 \Rightarrow \forall \lambda : \rho_{int} &= 1 + \left(\frac{K}{S}\right)_{mix} - \sqrt{\left(1 + \left(\frac{K}{S}\right)_{mix}\right)^2 - 1} \\
 \Rightarrow \forall \lambda : \rho_m &= K_1 + \frac{(1 - K_1)(1 - K_2)\rho_{int}}{1 - K_2 \rho_{int}} , \\
 \text{geometrías } d / 0 \text{ spinc} &\rightarrow \text{CIE - XYZ}
 \end{aligned} \tag{18}$$

1.3.4. Métodos modernos (aditivos y clásicos)

Reproducción del color en pantallas

Las pantallas, al tratarse de dispositivos de reproducción de color, son sistemas que generan diferentes estímulos cromáticos, C , en función de unos parámetros de control, o vector n . Habitualmente estos parámetros de control son accesibles al usuario y mediante ellos se determina el proceso de generación del estímulo (Malo, 2002). La caracterización del color ha de ser necesariamente independiente del dispositivo, por lo que se debe realizar una adecuada calibración de los sistemas de reproducción del color, en este caso de las pantallas.

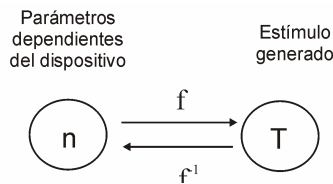


Figura 22. Modelo de un dispositivo de reproducción del color.

Calibrar un sistema de reproducción del color consiste en determinar las expresiones de las transformaciones f y f^{-1} . De esta forma, dado un conjunto de parámetros de control n , sabremos qué color se obtiene: $C = f(n)$ y lo que es más importante, se puede calcular el vector n que hay que introducir en el dispositivo para obtener un cierto color que queramos reproducir. Esto es equivalente a la formulación de colorantes vista en el apartado anterior.

La calibración de un dispositivo es análoga a la descripción del funcionamiento de cualquier sistema físico: se parte de un cierto (o ningún) conocimiento previo del sistema, que se complementa con ciertas medidas experimentales para obtener el modelo definitivo.

En función del conocimiento previo que se disponga sobre el sistema, podemos distinguir dos métodos de caracterización:

- Calibración basada en un modelo analítico de funcionamiento, $T = f(n, p)$.
- Calibración empírica (no se conoce la forma funcional de f).

El sistema de control y reproducción del color en un sistema informático tiene las siguientes partes:

- a) Una entrada de valores numéricos (vectores n), introducidos por el usuario vía teclado o procedentes de un fichero, cámara o escáner.
- b) El procesador y software, que manejan los datos numéricos.
- c) La tarjeta de video, que transforma los vectores n en señales analógicas que se introducen en el monitor.
- d) Un monitor, que transforma las señales procedentes de la tarjeta en radiaciones.

Las características de la representación n dependen básicamente de la naturaleza de la reproducción del color en el monitor y de las limitaciones de la tarjeta de video.

Cada píxel de la pantalla de un monitor consta de tres dispositivos que emiten radiación de diferente composición espectral (largas, medias y cortas longitudes de onda) en función de las señales eléctricas que llegan al monitor. Es decir, se generan colores mediante la superposición de las radiaciones de tres primarios, P_i^m , $i = 1, 2, 3$.

El proceso de generación de la radiación depende del tipo de monitor. Por ejemplo, en un monitor de tubos de rayos catódicos, CRT, un flujo de electrones se dirige a través de un tubo vacío, cuando un electrón incide sobre la superficie, el fósforo libera energía en forma de luz. Un monitor de plasma está formado por dos láminas de cristal con una capa de gas entre ellas y una rejilla metálica para aplicar la corriente, que en sus intersecciones ioniza el gas, dando lugar a la formación de un punto luminoso. En los monitores de cristal líquido, las señales eléctricas de entrada controlan las propiedades ópticas (transmitancia) de los materiales que forman la pantalla, modulando proporciones diferentes de emisión en cada una de las tres bandas.

Lo importante es que la emisión de los primarios rojo, verde y azul se controlan mediante una terna $n = (n_1, n_2, n_3)$. Cada parámetro de esta terna, n_i , controla aproximadamente el valor triestímulo de cada primario.

En una primera aproximación, cada parámetro n_i controla la luminancia del primario i , de forma que al incrementar n_i , aumenta $Y(P_i^m)$, mientras que la cromaticidad permanece aproximadamente constante.

Existen diferentes modelos de dependencia de las luminancias y las cromaticidades en función de n :

- Modelo simplificado (invertible). Se asume la independencia entre los primarios y la constancia total de las cromaticidades de cada primario. Se considera una dependencia exponencial para la luminancia de cada primario:

$$Y(p_i^m) = a_i n_i^\gamma \quad (19)$$

donde los exponentes de los parámetros n_i se conocen como "gamma" de los canales, esta dependencia implica que los pasos discretos de luminancia crecen con el valor n .

- Modelo intermedio (no invertible). Se sigue asumiendo independencia entre canales y una forma funcional para la variación de la luminancia, pero se tiene en cuenta que la hipótesis de constancia de la cromaticidad de los primarios no es totalmente correcta.
- Caso general (no hay modelo). Si existe interacción entre los primarios, no basta un conjunto de medida de los primarios aislados, porque el valor triestímulo resultante al encender los tres primarios no será la suma de los valores triestímulo de los primarios aislados. En este caso, se requieren medidas en toda la rejilla de vectores de control n y métodos de interpolación para el cálculo de f .

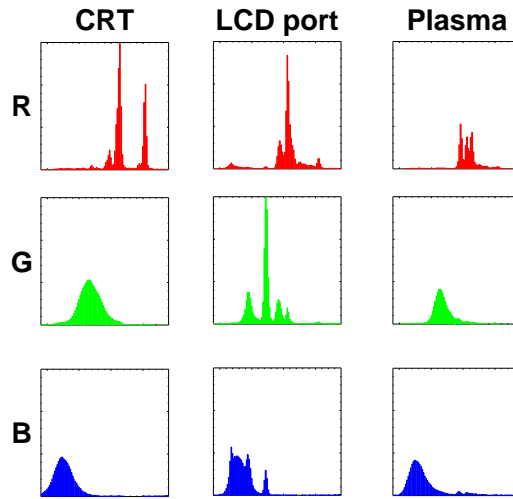


Figura 23. Espectros de los primarios de tres tecnologías de pantallas.

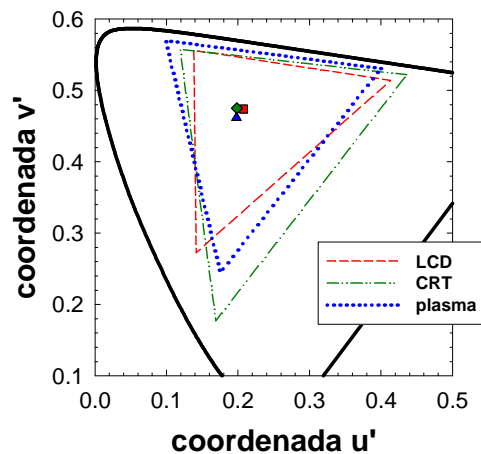


Figura 24. Triángulo de cromaticidades de los primarios de tres tecnologías de pantallas.

Tecnologías de impresión

Existen diferentes tecnologías de impresión, distinguiendo entre los sistemas tradicionales de impresión y las nuevas tecnologías de impresión digital (Kipphan, 2001; Martínez-Verdú, 2002). Entre las tecnologías tradicionales podemos citar la litografía (offset), el huecograbado (gravure, intaglio), la flexografía y la

serigrafía (screen printing) (Chuvienco, 2003; Crouch, 2003). Algunas de las características de estas tecnologías de impresión son:

El *hucograbado* es un sistema de impresión industrial que emplea una plancha hundida; en "hueco". La zona imagen está tallada en la base de la plancha, mediante celdillas o alvéolos y aparece hundida respecto de la zona que no imprime. Para imprimir, la plancha se sumerge en tinta líquida y mediante una espátula se retira el excedente de las celdillas. Luego se presiona suavemente sobre el soporte y le transfiere la tinta que contienen las mismas. El hucograbado es el único sistema de impresión capaz de dar más o menos capa de tinta por punto de imagen.

La *flexografía* es un sistema de impresión en relieve, esto quiere decir que la zona imagen está realzada de la zona no imagen. La plancha llamada cliché es de fotopolímero y, al ser éste un material muy flexible, es capaz de adaptarse a una cantidad de soportes muy variados. La flexografía es el sistema de impresión característico, por ejemplo, del cartón ondulado y de los soportes plásticos. En este sistema de impresión se utilizan tintas líquidas caracterizadas por su gran rapidez de secado. En cualquier caso, para soportes poco absorbentes es necesario utilizar secadores situados en la propia impresora (por ejemplo, en el caso de papeles estucados o barnices UVI). Las impresoras generalmente son rotativas y su principal diferencia con el resto de sistemas de impresión es el modo en que el cliché recibe la tinta. Esta se realiza por medio de un cilindro, el cuál está sumergido en el tintero y por medio de unos alvéolos o poros transfiere una capa de tinta regular y uniforme a la forma impresora o cliché. Posteriormente, el cliché transferirá la tinta al soporte a imprimir.

La *serigrafía* es el método de impresión que funciona a base de la aplicación de tinta a una superficie a través de un "pincel" montado sobre una malla fina de fibras sintéticas o hilos de metal,

montadas sobre un bastidor. El pincel es creado por un proceso fotográfico que deja pasar la tinta donde la emulsión ha sido expuesta a la luz. La tinta se esparce sobre la malla y se distribuye con un rasero para que pase por las áreas abiertas y plasme la imagen. Es uno de los procesos más versátiles ya que puede imprimir en casi cualquier superficie incluyendo: metal, vidrio, papel, plástico, tela o madera. Las máquinas de serigrafía manuales se usan para tirajes cortos o al imprimir en material muy grueso o delgado.

El *offset* es un sistema de impresión que usa planchas de superficie plana. El área de la imagen a imprimir está al mismo nivel que el resto, ni en alto ni en bajo relieve. Se basa en el principio de que el agua y el aceite no se mezclan. El método usa tinta con base de aceite y agua. La imagen en la placa recibe la tinta y el resto la repele y absorbe el agua. La imagen entintada es transferida a otro rodillo llamado mantilla, el cual a su vez lo transfiere al sustrato. Por eso se le considera un método indirecto. Las planchas para offset por lo general son de metal (aluminio) pero también las hay de plástico. Hay varias calidades de placa que determinan el precio y el uso que se le da (de acuerdo a su resistencia y facilidad de reuso). El offset es el sistema más utilizado por los impresores por la combinación de buena calidad y economía, así como en la versatilidad de sustratos.

Pero a través de los años la tecnología digital ha cambiado significativamente el modo en que funciona el sector de la impresión, por lo que existen ahora también sistemas de impresión digitales. Estos sistemas de impresión digital no sólo permiten reproducir los documentos en la máquina de imprimir, sino que también automatizan la gestión y preparación de documentos, eliminando así la costosa y prolongada preparación y calibración de la película, planchas y tintas.

Existen varios tipos de impresión digital, los principales son láser y chorro de tinta.

Láser (electrofotográfica): la impresión láser es un proceso de impresión electrostática. Se basa en la electricidad estática y sigue el siguiente proceso: En primer lugar, se carga negativamente toda la superficie de un tambor fotosensible, del tamaño de una hoja. Acto seguido, se hace avanzar el tambor línea a línea, y un láser recorre horizontalmente cada línea, ayudado por un espejo giratorio (en otras palabras, se produce un proceso de barrido). El láser incide en los puntos donde la tinta se deberá fijar, invirtiendo la carga (que ahora será positiva). El láser se desconecta en los lugares donde no deberá aparecer tinta (quedando con carga negativa). Por tanto, tras recorrer todo el tambor, solo habrá cargas positivas en los puntos donde deberá depositarse tinta, mientras que el resto (lo que constituirá el fondo blanco del papel) queda cargado negativamente. En otras palabras, se ha conseguido crear una imagen electrostática de la hoja a imprimir, mediante cargas positivas sobre un fondo de cargas negativas.

Los puntos cargados positivamente en el tambor atraen partículas de tóner (material electronegativo mezclado con un pigmento que lo dota de color). Por tanto, la imagen final queda "dibujada" sobre el tambor por medio de puntos negros de tóner. El papel a imprimir se carga positivamente en su totalidad. Por tanto, al hacerlo pasar por el tambor, atraerá a las partículas de tóner (que tienen carga negativa), y la imagen quedará finalmente formada sobre papel. Finalmente, el tóner adherido al papel se funde mediante la aplicación de calor, haciendo que quede totalmente fijado al papel. Se consigue así imprimir una página en una sola pasada, al contrario que en las impresoras de chorro de tinta, donde la página se imprime línea a línea. Antes de imprimir una nueva página, se realiza un borrado electrostático del tambor, dejándolo preparado para un nuevo ciclo.

Chorro de tinta: Construye la imagen línea a línea lanzando chorros microscópicos de tinta directamente sobre el papel. Este método de impresión hace que estas impresoras sean un medio de reproducción de alta calidad aunque sea a expensas de la velocidad. Proyectan la tinta sobre el papel de varias formas y la trama de la distribución puede ser estocástica, como una pintura puntillista, o rasterizada (en una trama). La tinta puede ser proyectada por ráfagas de calor o por la vibración de un elemento piezoeléctrico. La cantidad de tinta proyectada está controlada por el procesador de imagen de la impresora y por el software del controlador.

La calidad de la reproducción del color depende de distintos factores, principalmente de las propiedades características de las tintas y sustratos, de la tecnología de impresión, de las condiciones de impresión, etc. Otro factor importante que afecta a la reproducción del color es el proceso de tramado o "halftone".

En todas las tecnologías de impresión citadas anteriormente se realiza una impresión tramada, excepto la impresión de huecograbado, donde la graduación visual de grises se consigue modulando la concentración de tinta mediante el grosor de la película sobre el soporte. En las otras técnicas se modula la gama de grises a partir de dos colores (papel blanco y tinta negra) utilizando una técnica de tramado de símbolos, la cual aprovecha la reproducción en mosaico del sistema visual para integrar un gris intermedio a partir de blanco y negro, suponiendo impresiones monocromas. Se puede distinguir entre dos tipos de imagen monocroma tramada: tramado analógico y tramado digital o estocástico. En la primera la imagen está formada por un conjunto de puntos de tamaño variable, pero con un espaciado constante, y la imagen tramada digital contiene un patrón de puntos de tamaño constante pero periodicidad espacial variable. Con este segundo método se consigue una imagen más nítida, pero introduce también

problemas nuevos de control debido a que los puntos son muy pequeños (Figuras 25 y 26).

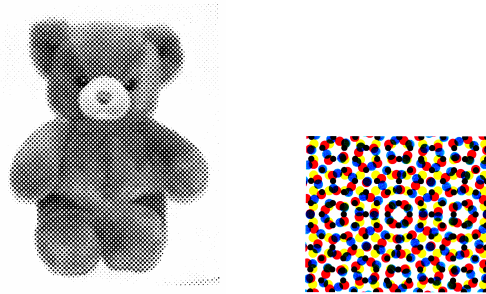


Figura 25. Tramado analógico.

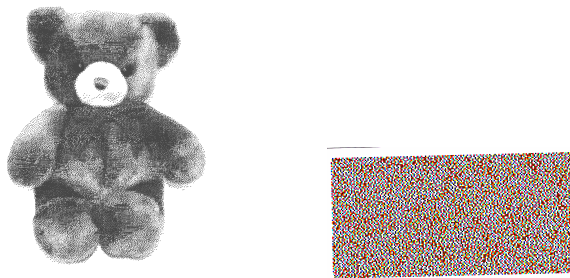


Figura 26. Tramado digital.

Si ahora tenemos en cuenta las impresiones a color, primero debemos diferenciar entre color plano y cuatricromía. Los colores planos impresos se obtienen a partir de tintas premezcladas, siguiendo las pautas desarrolladas en la teoría Kubelka-Munk, por lo que no se obtiene ningún color como integración visual sobre un patrón tramado de puntos. En cuatricromía sí se utiliza la reproducción por mosaico a partir de cuatro tramas de colores primarios: cian (C), magenta (M), amarillo (Y) y negro (K). La necesidad de utilizar primarios sustractivos en las tecnologías de impresión se debe a dos factores: primero que la película de registro se expone siempre en modo negativo y segundo que el sustrato final de impresión actúa como medio óptico que superpone espectralmente las luces transmitidas o reflejadas de los primarios

CMYK. Como cada primario sustractivo debe controlar la banda espectral complementaria, la luz que incide finalmente sobre los ojos llevará consigo la información cromática original en RGB.

La impresión a color consiste entonces en superponer cuatro tramas moduladas de puntos coloreados (CMYK) en diferentes orientaciones para evitar por ejemplo patrones de interferencia a nivel macroscópico (patrones moiré) que influirán en la calidad de la imagen. Los ángulos estándar que se usan habitualmente son: 15, 75, 0 y 45 para los colores C, M, Y y K, respectivamente, esta disposición de las cuatro tramas se denomina roseta tramada.

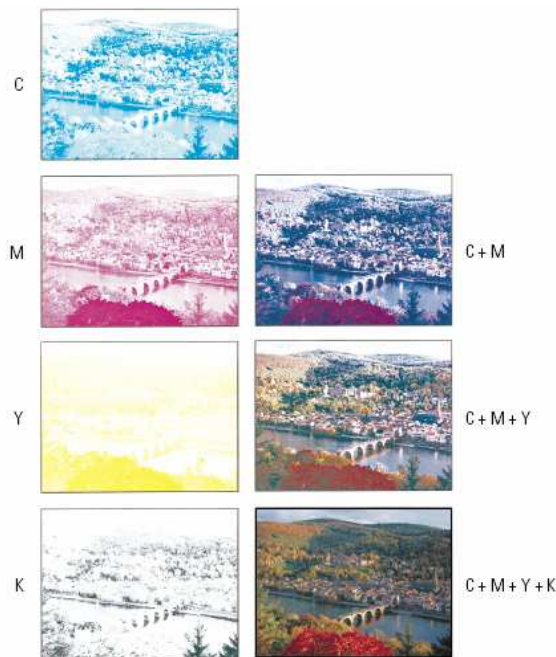


Figura 27. Separación y superposición para la reproducción del color en impresión offset.

La razón de usar la roseta tramada se debe a que los sistemas tradicionales de impresión no son capaces de controlar de manera exacta el registro o superposición de las separaciones de color. Pero con las nuevas tecnologías digitales, es posible utilizar el mismo ángulo de registro, puesto que los procesos de impresión resultan

más estables y más fáciles de controlar. Entre las ventajas de un único ángulo de registro destaca la ampliación de la gama de color proporcionada, pero cualquier error por pequeño que sea puede afectar a la reproducción del color generando colores falsos o patrones de moiré.

En resumen, en tecnología de impresión se utiliza el método de tramado (halftone) como un sistema de mezcla de color aditiva, ya que el área impresa resulta de la suma de luces procedentes de cada punto del tramado. Sin embargo, los primarios que se utilizan son sustractivos, ya que para predecir el color de una mezcla de dos o más tintes es necesario aplicar los principios de la mezcla de color sustractiva. Por tanto, se trata de un método híbrido o mixto de reproducción del color.

Reproducción del color en dispositivos de captura de imagen: CMOS, CCD

El elemento básico que determina las características de una cámara fotográfica digital es el sensor, un dispositivo optoelectrónico que reemplaza a la tradicional película fotográfica.

El sensor es una matriz de pequeñas celdas perfectamente alineadas en filas y columnas. Cada una de esas celdas es un elemento fotosensible microscópico, con la capacidad de producir impulsos eléctricos de distinta intensidad en función de la cantidad de luz que recibe. Cada celda es, entonces, como un pequeño "radiómetro" que producirá un flujo eléctrico variable según la cantidad de luz que incida en su superficie. Este dispositivo, a pesar de su fotosensibilidad, percibe las variaciones de intensidad de la luz, pero sin distinguir los colores de la imagen. Es un dispositivo "ciego" al color. Para que el sensor pueda captar los colores, se deben emplear filtros que dividan los colores de la escena en rojo, verde y azul.

Existen dos tipos de sensores principales: los sensores de tipo CCD (Charged Couple Device) y los sensores de tipo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) (Holst, 2005; Janesick, 2000). Los sensores CCD tienen mayor sensibilidad a la luz, más calidad y también precio más alto, en tanto que los de tipo CMOS son menos sensibles y de menor calidad, pero al ser fáciles de fabricar son más baratos.

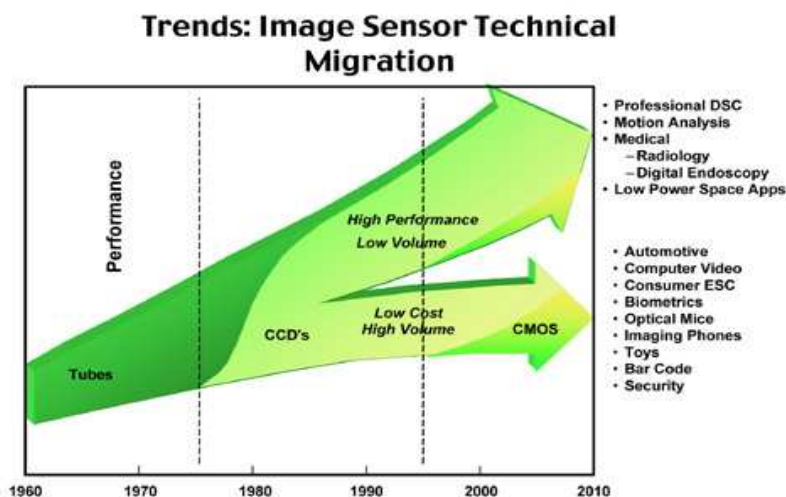


Figura 28. Comparativa de prestaciones entre la cámara CMOS y CCD.

El CCD es un chip que convierte las señales luminosas en señales electrónicas para ser manipuladas, con el fin de transmitir las, registrarlas o visualizarlas en un monitor. Recibe la señal luminosa que es concentrada por el juego de lentes de la cámara antes de llegar al CCD. Esta señal luminosa es separada en sus colores componentes al ser reflejada en un filtro-espejo en el prisma de descomposición, con lo que cada color es dirigido a un CCD diferente de acuerdo al porcentaje que ocupaba en la señal original.

Los CCD están hechos de semi-conductores de silicio y consisten en una matriz de diodos independientes, llamados píxeles. Cuando la luz incide en los píxeles, se produce un chorro de

electrones proporcional al número de fotones incidente en cada uno de ellos. Para medir la cantidad de electrones producidos, la electrónica de la cámara transfiere dichos electrones (fila a fila, y columna a columna) a un amplificador. Así se genera una señal proporcional al número de electrones por cada píxel. Dichas señales analógicas, se convierten en señales digitales que son almacenadas en un ordenador en forma de fichero con un conjunto de números para cada fila y columna. Como los CCD son dispositivos de imagen, la resolución depende de la cantidad de puntos o píxeles que manejen en su superficie.

El CMOS es un dispositivo semiconductor formado por dos transistores de efecto de campo de óxido metálico (MOSFET), uno del tipo n (NMOS) y otro del tipo p (PMOS), integrados en un único chip de silicio. Su funcionamiento básico es igual al del sensor CCD.

Al estudiar la reproducción del color en los dispositivos de captura debemos tener presente la acotación o el control del espacio RGB dependiente del dispositivo. Que el espacio de color sea dependiente del dispositivo complica la resolución del control del color en estas tecnologías. Ante tal variedad de espacios de representación del color, se hace necesario establecer las transformaciones para pasar de los valores RGB característicos de la cámara a valores triestímulo CIE-XYZ, una vez calculado el perfil colorimétrico de la cámara a partir de la caracterización espectral de dicha cámara.

Estos dispositivos de captura son sistemas aditivos de reproducción del color, si se quiere que el nivel de reproducción sea exacto, es condición necesaria y suficiente que las sensibilidades espectrales de estos dispositivos, o sus funciones de igualación salvo el factor de escalado, sean una combinación lineal exacta de las funciones de igualación CIE-1931 XYZ. Esta condición se conoce como condición de Luther (Luther, 1927; Horn, 1984).

El concepto óptico de sensibilidad espectral, como el cociente respuesta vs. entrada radiométrica, significa inevitablemente que en la primera etapa de captura fotónica de los fotosensores, las curvas espectrales de sensibilidad bruta o pura deben ser totalmente positivas, ya que éstos dispositivos “cuentan” y “suman” fotones, los cuales se reconvierten en una señal eléctrica por efecto fotoeléctrico.

El diseño óptico básico de cualquier dispositivo de captura de una imagen consta de:

1. Un conjunto de filtros ópticos adosados a un sistema óptico de enfoque: uno para evitar la radiación ultravioleta (UV), τ_{UV} . Otro, el de la lente generalmente, para evitar la radiación infrarroja (IR), τ_{IR} . Y otros tres filtros de colores RGB τ_R , τ_G , τ_B para la separación espectral de la información fotoeléctrica separada en los tres canales de color.
2. Un dispositivo optoelectrónico de tipo semiconductor, (CCD o CMOS), como sistema fotosensor base con sensibilidad espectral s .

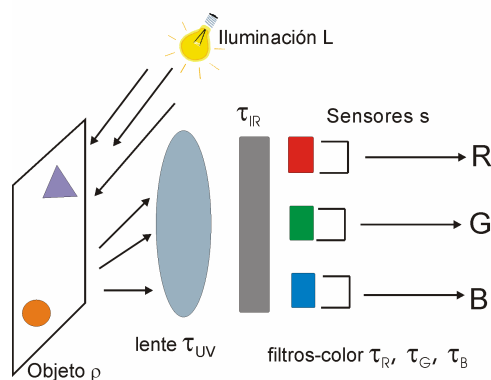


Figura 29. Esquema básico de diseño óptico de las sensibilidades espectrales de un dispositivo de captura de imágenes.

Expresado matemáticamente, y teniendo en cuenta que el funcionamiento del dispositivo se considera lineal, la terna $T_{RGB} = [R, G, B]^t$ de respuesta del dispositivo se obtiene a partir de:

$$T_{RGB} \propto \bar{T}_{RGB} \cdot C \quad (20)$$

donde:

$c = \text{diag}(L) \cdot p$ vector luz incidente

$\bar{T}_{RGB} = [s_R \ s_G \ s_B]$, siendo:

$s_R(\lambda) = \tau_{UV}(\lambda)\tau_{IR}(\lambda)\tau_R(\lambda) s(\lambda)$, sensibilidad espectral del canal R

$s_G(\lambda) = \tau_{UV}(\lambda)\tau_{IR}(\lambda)\tau_G(\lambda) s(\lambda)$, sensibilidad espectral del canal G

$s_B(\lambda) = \tau_{UV}(\lambda)\tau_{IR}(\lambda)\tau_B(\lambda) s(\lambda)$, sensibilidad espectral del canal B

Para conocer las sensibilidades espectrales de cada uno de los canales se puede realizar una calibración del dispositivo de captura. Dicha calibración consta de tres etapas: caracterización espacial, espectral y colorimétrica. La *caracterización espacial* (Lasarte, et al., 2005) consiste en aplicar un algoritmo de corrección lineal, para compensar la falta de uniformidad espacial de respuesta del mosaico sensor cuando el campo de iluminación es homogéneo. La *caracterización espectral* (Martínez-Verdú, Pujol, Capilla, 2002) consiste en la obtención de las pseudo-funciones de igualación RGB del dispositivo de captura. Es decir, obtener las respuestas de cada canal de la cámara (valores triestímulo) en función de la longitud de onda de la señal (monocromática) incidente. La *caracterización colorimétrica* (Martínez-Verdú, Pujol, Capilla, 2003) es el último paso del modelo seguido. Consiste en calcular el perfil colorimétrico, que es una matriz que permite pasar de niveles digitales (dependientes del sistema de captura) a valores triestímulo (independientes del sistema de captura).

2. Definición del proyecto

Hasta ahora en los diferentes puntos hemos ido hablando de una forma muy general de nociones y conceptos que son necesarios para el desarrollo de este proyecto. En primer lugar hemos definido los elementos básicos de la colorimetría lineal, que nos permiten definir el sólido de color a partir del cual desarrollaremos las distintas aplicaciones de este proyecto. En un segundo bloque se han mostrado las principales tecnologías de reproducción del color, analizando en cada una de ellas qué proceso se sigue para la reproducción del color.

2.1. Consideraciones iniciales

En 1980 M.R. Pointer ya se interesó por el análisis de las gamas de colores de diferentes sistemas de reproducción del color, como así se muestra en su artículo "*The Gamut of Real Surface Colours*" (Pointer, 1980), donde realizó un análisis de distintas gamas de colores pertenecientes a distintos sectores presentes en esa época. En primer lugar determinó una gama máxima de colores reales, para ello consideró cuatro gamas de colores diferentes: las muestras de la "cascada de colores límites del Munsell", formada por 768 colores en total, 310 muestras del Atlas Mate del Munsell, 1618 muestras tabuladas en la carta de color de la Horticultura Royal Society y 1393 muestras de colores que fueron medidos con un espectrofotómetro. Representó el sólido de color asociado a cada una de las gamas en los espacios CIE 1976 $L^*u^*v^*$ y en CIE 1976 $L^*a^*b^*$, el sólido de color obtenido con esta gama de colores fue seccionado en planos horizontales ($L^* = \text{cte}$, u^* vs. v^* y a^* vs. b^*), y planos verticales ($h^*_{uv} = \text{cte.}$, L^* vs. C^*_{uv} y $h^*_{ab} = \text{cte.}$, L^* vs. C^*_{ab}) y fue comparado con la gama de colores óptimos. Determinó

entonces una gama máxima de colores a partir del estudio de todas estas gamas de colores.

Desde 1980 hasta ahora han surgido nuevas tecnologías de reproducción del color, así como el desarrollo de nuevos pigmentos para cubrir las necesidades comerciales. En química del color han ido apareciendo estudios sobre nuevos colorantes, como los colorantes especiales (Morrison, 2005) y de alto rendimiento (Smith, 2002), para generar aspectos visuales impactantes. Si nos centramos en las técnicas de reproducción del color, podemos comprobar que el mercado se ha extendido desde entonces con el objetivo de ofrecer mejores prestaciones al cliente o usuario. Actualmente existen nuevas pantallas de visualización de datos como las pantallas de cristal líquido (LCD), de plasma o flexibles frente a las presentes en aquella época (CRT). El mundo de la fotografía ha sufrido también un gran avance con la fotografía digital, apareciendo en el mercado las cámaras CCD y CMOS. Y referente a las tecnologías de impresión, se han ido desarrollando nuevos sistemas de impresión: chorro de tinta, sublimación, impresión textil, etc.

En el año 2002, Pointer retomó el asunto pidiendo colaboración para generar una gran base de datos de gamas de colores reproducibles por las tecnologías actuales de coloración. Siguiendo el trabajo planteado por Pointer y a la vista del gran avance tecnológico en cuanto a la reproducción del color, en este trabajo se pretende ampliar el estudio sobre las diferentes tecnologías de reproducción del color, para así contribuir a la construcción de la base de datos propuesta por Pointer.

2.2. Cálculo de colores distinguibles según la fuente luminosa

Como se ha dicho en alguna de las secciones anteriores, la percepción humana del color es esencialmente trivariante, por lo que todos los colores distinguibles por el ojo humano se encuentran distribuidos en una estructura tridimensional denominada sólido de color. La forma de dicho sólido de color no variará únicamente dependiendo del espacio de color en el que se trabaje, sino también dependiendo del iluminante utilizado. En 1935, MacAdam desarrolló un algoritmo para la búsqueda de colores óptimos para poder determinar la forma del sólido de color.

Analizando el algoritmo original de MacAdam, es fácil darse cuenta que no muestrea sistemáticamente todos los colores óptimos del espectro visible. Esto significa que los límites de MacAdam representados en la bibliografía actual (Berns, 2000; Kuehni, 2003; Ohta, Robertson, 2005) son curvas interpoladas a partir de un número discreto, bastante reducido de datos originales. Además sólo realizó los cálculos para un número muy reducido de iluminantes, como el A, D65, C y E, y con valores de Y siempre entre 10 y 95.

Debido a este hecho, en este proyecto de tesis se plantea un algoritmo de búsqueda sistemática de colores óptimos, de forma que éstos puedan calcularse para cualquier iluminante (tipo F, P, D, etc) e incluso para lámparas reales (de descarga, fluorescentes, LED, etc). Y que permita variar el factor de luminancia (Y), entre 0 y 100, no únicamente en el intervalo de 10 a 95 como MacAdam hizo. Así podrá visualizarse de forma completa el sólido de color y comparar su forma en función del espacio de color y del iluminante utilizado.

Si una vez representado el sólido de color se calcula el número de colores distinguibles según la fuente luminosa dentro del

sólido de color, podríamos realizar una comparativa entre las distintas fuentes y establecer una clasificación entre ellas atendiendo a la capacidad de cada una de ellas de la reproducción de color y valorar así la mejor fuente luminosa en función de su calidad colorimétrica o rendimiento en color.

Para estimar cuántos colores distinguibles (Pointer, 1998; Kuenhi, 2003, 202) existen podríamos usar varios métodos que nos permitieran realizar esta clasificación de forma cualitativa:

- Modelo de discriminación de Krauskopf y Gegenfurtner (Krauskopf, Gegenfurtner, 1992): este modelo nos permite completar los locus de MacAdam de claridad constante con elipses de discriminación aumentando el área según aumenta la distancia al punto acromático. De este modo, calculando el número de elipses de discriminación (Brown, MacAdam, 1949; Wyszecki, Fielder G. H., 1971; Luo, Rigg, 1986) asociado a cada plano de claridad constante podemos estimar el número total de colores distinguibles.
- Rellenar el sólido con cuadrados de área unidad en un espacio de color lo más uniforme posible: este método es más sencillo que el anterior y nos permite calcular el número de colores distinguibles atendiendo al número de cuadrados que cubren totalmente el sólido de color. Este método es una alternativa computacional, no basada en la psicofísica/percepción del color, para calcular el volumen del sólido de color. Además, si aplicamos este modelo en un espacio de color uniforme ya no tendríamos elipses de discriminación sino esferas por lo que este método sería una buena aproximación y sólo quedaría pendiente la determinación de la dimensión perceptual de las esferas. La clasificación obtenida con este método debería corroborar la clasificación del rendimiento colorimétrico o

índice de calidad de los iluminantes o fuentes reales de luz del método descrito anteriormente.

El método propuesto es una alternativa al algoritmo actual de cálculo de la calidad colorimétrica o índice de calidad propuesto por la CIE (CIE 13.3:1995). Es un método fácil de desarrollar y además establece una clasificación de los iluminantes o fuentes de luz sin necesidad de tomar como referencia ningún iluminante, por lo que la clasificación se obtiene de forma general. De este modo podemos analizar qué iluminante o fuente real de luz es mejor en cuanto a la reproducción total del color para así tenerlo en cuenta a la hora de utilizar uno u otro. Además, este trabajo se podría extender para mostrar cómo el número de colores distinguibles está relacionado con la gama de colores reproducibles de diferentes dispositivos de reproducción del color (captura, visualización, impresión).

2.3. Gammas de colores distinguibles en discromatopsias

El ojo humano tiene tres fotorreceptores en la retina que son los responsables de la percepción del color. Pero pueden existir observadores con dichos fotorreceptores anómalos (Mollon, Pokorny, Knoblauch, 2003), por lo que presentan una percepción del color distinta a la de un observador normal, hablamos entonces de tricrómatas anómalos. O bien puede que el observador no presente uno de estos tres fotorreceptores, son los denominados dicrómatas.

Sabemos que el sólido de color es consecuencia de la trivariancia en la percepción del color y que los colores que forman la frontera del sólido de color son colores de máxima pureza y son llamados colores óptimos. Nuestro planteamiento ahora es valorar la existencia de colores óptimos para observadores tricrómatas

anómalos o para dicrómatas y calcular entonces los colores óptimos para poder comparar la gama de colores percibida por estos observadores con la gama de colores percibida por un observador normal y establecer las diferencias existentes entre ellos.

Anteriormente se ha establecido la condición de la existencia de colores óptimos para estos "observadores" basándonos en que el espacio de representación del color es un espacio vectorial de representación. Este hecho nos permitirá aplicar nuestro algoritmo de cálculo de colores óptimos a estos "observadores", teniendo en cuenta que para los tricrómatas anómalos el desarrollo será el mismo ya que la única diferencia radica en el hecho de que los máximos de absorción de los fotorreceptores están desplazados respecto a los de un observador normal. Por lo tanto se podrá representar también el sólido de color y observar si presenta una forma diferente al sólido de color de un observador normal. Para los dicrómatas no podremos hablar de sólido tridimensional, teniendo que pasar a un diagrama cromático plano. Se podrá definir entonces un límite que nos indicará la gama de colores distinguibles por estos observadores, con el fin de comparar estas gamas de colores con la de otros observadores.

A partir del cálculo del número de colores distinguibles podremos decir si la gama de colores para estos observadores es más reducida que la de un observador normal. Para ello deberíamos tener en cuenta que el modelo de discriminación de color para observadores con deficiencias no será el mismo que para observadores humanos sin anomalía. Actualmente se están estudiando posibles modelos para los dicrómatas (Wachtler, Dohrmann, Hertel, 2004; Capilla, Luque, Ajenjo, 2004) pero no existe todavía ningún modelo exacto. Para observadores tricrómatas anómalos tampoco existe un modelo estándar ya que, el desplazamiento del máximo de absorción no es el mismo para todos ellos, por lo que resulta difícil encontrar un modelo que

caracterice a todos ellos. Por lo que el cómputo de colores distinguibles no nos ofrecerá resultados exactos sino sólo aproximados en cuanto el número de colores distinguibles por estos observadores.

2.4. Gammas de colores distinguibles en visión animal

De la misma forma que para visión humana calculamos los colores óptimos con el fin de poder representar el sólido de color y conocer así la gama de colores percibida por el ojo humano, podemos calcular los colores óptimos para visión animal si conocemos las sensibilidades espectrales de los fotorreceptores que componen su sistema visual. Como hemos visto, la condición para la existencia de colores óptimos es que el espacio de color definido sea un espacio de representación lineal del color, hecho que también ocurre en visión animal.

En el apartado 1.1.2 se ha visto que, dependiendo de la especie animal, se puede tener diferente número de fotorreceptores, por lo que el sólido de color tridimensional podrá definirse para aquellas especies que presenten tres fotorreceptores. Si únicamente tienen dos fotorreceptores no se hablará de sólido de color tridimensional, sino de plano cromático. Y si hubiese más de tres estaríamos en un espacio *n-dimensional*, por lo que para la representación gráfica se deberán realizar todas las combinaciones posibles entre las distintas variables para su visualización.

En el algoritmo de búsqueda de colores óptimos, que se detallará más adelante, la condición de búsqueda de colores óptimos es que estos colores óptimos tengan un valor del factor de luminancia Y (L^*) determinado, es decir, son agrupados dependiendo del valor del factor de luminancia Y (o claridad L^*). Pero si este algoritmo se utiliza para el cálculo de colores óptimos

de animales tendrá que definirse un criterio de ordenación diferente, ya que para visión animal no está definido un modelo perceptual del color que nos permita hablar de la variable claridad. Si consideramos especies animales con tres fotorreceptores, donde sí podremos definir una estructura tridimensional ya que los colores también podrán ser definidos por tres valores triestímulos RGB o LMS, la condición de búsqueda de colores óptimos será sustituida por la suma de los valores triestímulos R, G y B, escalada a 100. El algoritmo buscará sistemáticamente la pareja de longitudes de onda λ_1 y λ_2 que definan un espectro con dos únicos posibles saltos en su reflectancia o transmitancia (Figura 11) donde la suma de los valores triestímulo R, G y B esté dentro de un intervalo fijado.

En la actualidad están surgiendo estudios que pretenden establecer un modelo básico de discriminación del color para visión animal (Kelber, Vorobver, Osorio, 2003). Partiendo de ese modelo podríamos realizar el cómputo de colores distinguibles atendiendo al modelo para poder comparar la visión entre diferentes animales pertenecientes a la misma especie o entre aquellos en los que el modelo fuese válido. Si no fuera así, el cómputo de colores distinguibles podría realizarse según el modelo de discriminación del color para visión humana, pero únicamente sería una forma de calcular el volumen del sólido de color para poder ser comparado con el del sólido de color humano ya que, no nos daría información sobre el número de colores distinguibles por la especie animal estudiada.

2.5. Gammas de colores distinguibles en visión artificial

Anteriormente ya se ha dicho que en los dispositivos de captura la teoría tricromática del color puede aplicarse, ya que la información fotoeléctrica es separada en tres canales mediante tres filtros de color, es decir, un color podrá definirse por tres valores triestímulo, RGB.

Esto significa que todos los colores codificados por el dispositivo se distribuyen también en una estructura tridimensional en cuyos vértices, superior e inferior se encontrarán respectivamente el blanco y el negro. Se puede hablar, por tanto, de sólido de color como lo hacemos para visión humana. Este sólido de color determinará la gama de colores del dispositivo ya que todos los colores reproducidos por el dispositivo se encontrarán dentro de esa frontera. La forma y el volumen del sólido de color dependerán del espacio de color de captura. Por lo que el número de colores distinguibles será diferente dependiendo de las capacidades de discriminación del color de cada dispositivo. En este caso si podríamos utilizar el modelo de discriminación del ojo humano, ya que en estos sistemas el cerebro humano es el que actúa como observador.

El criterio de ordenación que se seguirá en la búsqueda de colores óptimos será el mismo que el expuesto en visión animal, es decir, que la suma de los valores triestímulo $[R\ G\ B]$, dependientes del dispositivo, tenga un valor determinado fijado por nosotros con un margen de error.

No obstante, a priori, todos los colores óptimos asociados al dispositivo de captura, no tienen por qué ser necesariamente los mismos que los asociados al sistema visual humano debido al metamerismo del dispositivo: un estímulo-color codificado en el espacio de color CIE, puede ser codificado de manera diferente en

el espacio de color RGB del dispositivo, y viceversa. Si el dispositivo de captura es un colorímetro o cumple la condición de Luther, es decir, sus funciones de igualación son una combinación lineal de las funciones de igualación CIE del observador estándar, los colores óptimos encontrados deberían ser los mismos en ambos casos, pero si el dispositivo no es un colorímetro podrían ser diferentes. Sin embargo, si tenemos en cuenta la propia definición de color óptimo, el metamerismo del dispositivo no debería ser importante ya que los colores óptimos no tienen metámeros espectralmente positivos excepto ellos mismos. Si calculamos los colores óptimos del dispositivo en su propio espacio y luego se codifican en el espacio CIE-XYZ, podremos comprobar si se cumple este corolario, independientemente que cumplan o no la condición de Luther.

En paralelo, este estudio permitiría analizar si la gama de colores asociada a un dispositivo de captura presenta limitaciones en su gama de color al ser comparada con la gama asociada al sistema de visión humano. Hasta ahora existen dos métodos. Uno de ellos consiste en el muestreo de todas las posibles funciones de reflectancia teniendo en cuenta el metamerismo del dispositivo pero, sin tener en cuenta los colores óptimos, que son realmente los que definen la frontera del sólido de color (Morovic, Morovic, 2003). El otro método consiste en calcular los colores óptimos del dispositivo codificado en su propio espacio RGB y transformarlo a XYZ usando un perfil colorimétrico (Martínez-Verdú, 2006).

2.6. Gammas de colores reproducibles en la industria

2.6.1. *Tecnologías sustractivas de reproducción*

En la colorimetría aplicada es importante por varias razones conocer la gama de colores reproducibles. En sectores de colorimetría industrial que utilizan tecnologías sustractivas, como textil, plásticos, pinturas, se usa generalmente una base de datos como control de la gama de colores, siguiendo generalmente criterios comerciales y de moda según los clientes. De esta forma muy pocas veces se valoran las capacidades reales de generación de colores del fabricante. Del mismo modo, pocas empresas estudian si sus gamas de colores alcanzan los límites de MacAdam o si cubren más o menos homogéneamente el sólido de color de Rösch-MacAdam.

Debido a la falta de este tipo de estudios, en este proyecto también pretendemos realizar el análisis de distintas gamas de color pertenecientes a diferentes sectores industriales, para así establecer cualitativamente las capacidades en cuanto a reproducción del color de cada uno de ellos. De esta forma, nuestro estudio podría ayudar al fabricante en el uso de nuevos tintes o pigmentos que amplíen la gama de color ofrecida al cliente. Por esta razón y siguiendo el trabajo de Pointer, hemos desarrollado un método simple para comparar gamas de colores de diferentes industrias, basado en la representación de los colores reproducidos en planos de claridad (L^*) y ángulo-tono (h_{ab}^*) constantes.

Se pretende realizar un estudio sobre la gama de colores asociada a diferentes sistemas de reproducción del color. Se analizará dicha gama atendiendo a la familia de colorantes primarios y de sustratos empleados, con el fin de comprobar si se cubre la zona delimitada por los límites MacAdam.

Así, como también se valoraran las diferencias en la gama de colores reproducida mediante el modelo de mezcla (formulación) de colores y la generación sistemática de colores. El primer método se basa en la obtención de colores partiendo de la caracterización colorimétrica de los colorantes primarios utilizados, lo que permite variar sistemáticamente las concentraciones y obtener una combinación infinita, es decir, mayor número de colores. Por el contrario, en el método de generación sistemática, se generan colores vía demanda (comercial, interna), existiendo una reducida gama de colores.

Como ejemplo de lo explicado anteriormente, se evaluarán las capacidades de generación del color a partir del muestrario proporcionado por una empresa perteneciente al sector del plástico ya que, consideramos que es un sector muy importante debido a la gran presencia de materiales plásticos en la actualidad (Charvat, 2004). En este estudio se realizará la comparación atendiendo a factores como: el sustrato utilizado (polipropeno, polietileno...), el acabado (brillo, rugoso) y el espesor. De la misma forma, el estudio se podría extender al sector de pinturas y textil. A partir de unas muestras facilitadas por empresas, se procederá a la obtención de los datos colorimétricos, para finalmente hacer la representación en planos de claridad y tono constante. Se concluirá así la evaluación de las capacidades de reproducción de cada uno de los sectores estudiados, que no son todos los posibles, pero al menos los más representativos de nuestro entorno industrial más cercano.

2.6.2. *Tecnologías aditivas de reproducción*

Entre estas tecnologías se encuentran las pantallas de visualización de datos y los dispositivos de captura de imágenes (cámaras). En las pantallas de visualización existe una relación biunívoca entre los valores cromáticos dependientes del dispositivo

y los valores triestímulo T_{XYZ} , la caracterización colorimétrica delimita matemática y físicamente el conjunto de colores reproducibles. Es decir, dado un color digital RGB de una pantalla de visualización, le corresponde una y sólo una especificación XYZ. Esto es así porque la generación de un estímulo-color en pantalla se debe exclusivamente a una codificación dependiente del dispositivo en cuestión. En las pantallas de visualización de datos podríamos simular el sólido de color tras la calibración (Berns, Katoh ,2002; Malo, Luque, 2002) y realizar el cálculo de colores distinguibles, con el fin de poder comparar la capacidad de reproducción del color entre diferentes tipos de pantallas de visualización.

En cambio, en los dispositivos de captura, debido al metamerismo del dispositivo, no será tan fácil la obtención de la gama de colores reproducibles, ya que existen infinitos estímulos-color que pueden captarse con la misma codificación RGB, aún cuando algunos de ellos pueden tener ternas XYZ diferentes y viceversa. Esto se debe principalmente a la interacción iluminante-objeto-observador. En un dispositivo de captura, un conjunto infinito de estímulos-color se reduce a un conjunto finito de ternas triestímulo por el principio de univariancia, se trata entonces de calcular qué ternas son simultáneamente discriminables por el ojo humano. Para ello nos basamos en el cálculo de colores óptimos siguiendo el planteamiento dicho en secciones anteriores. Se calcularán los colores óptimos aplicando nuestro algoritmo, para poder representar el sólido de color y comparar la capacidad de reproducción colorimétrica entre diferentes dispositivos.

2.6.3. *Tecnologías mixtas de reproducción*

En este tipo de reproducción, como en las anteriormente citadas, no se encuentran estudios que analicen la gama de colores reproducida. En esta parte del trabajo se realizará el estudio de

diferentes tecnologías de impresión. Se pretende analizar la gama de colores reproducida dependiendo de los tintes usados o del sustrato utilizado.

En la industria gráfica se usan cartas de color (Figura 30) para analizar la gama de colores del dispositivo. Durante muchos años, la carta ANSI IT8 ha servido como referencia para calibrar escáneres e impresoras. En distintos trabajos se ha estudiado la idoneidad y la eficacia de estas cartas de color dependiendo del dispositivo, proponiendo diferentes modificaciones que ofrezcan un mejor resultado. Por esta razón, por ejemplo, para la calibración de cámaras se suelen usar dos versiones de la carta IT8: la clásica y una nueva carta DC color checker. De forma parecida, otras cartas (ECI 2002, CIE 2.9 offset, etc.) ofrecen una alternativa a la carta ANSI IT8 7/3 usada normalmente. Los aspectos que se tienen en cuenta para el diseño de estas cartas de color (la linealidad de las curvas, los colores primarios y secundarios, etc.) son los que mejor caracterizan el dispositivo a estudiar.

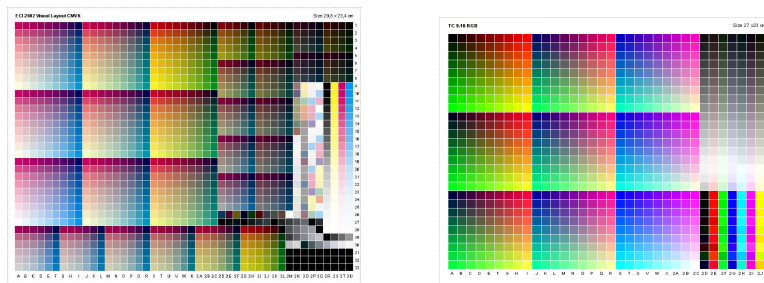


Figura 30. Carta de color ECI 2002 CMYK utilizada para impresión láser y offset (derecha). Carta de color TC9.18.RGB para impresión chorro de tinta.

Usando estos colores como referencia, la gama de colores del dispositivo puede ser comparada con los límites de MacAdam y analizar si se cubre homogéneamente el sólido de color de Rösch-MacAdam representando los colores reproducidos en planos de claridad y ángulo-tono constante y comparándolos con los límites de MacAdam.

La comparación de la gama de colores pertenecientes a impresión puede realizarse atendiendo a diferentes factores. Por un lado se realizará la comparación entre diferentes tecnologías de impresión para establecer un ranking en cuanto a reproducción del color. Para ello será necesario que las condiciones de impresión sean las mismas en todas las tecnologías de impresión estudiadas (sustrato, carta de color, iluminante...). Por otro lado, se realizará un análisis de la reproducción del color en impresión pero dependiendo del sustrato utilizado. Es decir, dado un tipo de impresión (láser, chorro de tinta...) se analizará su gama de color según el espesor del papel, el tipo de acabado (brillo, mate...) con el fin de establecer qué sustrato presenta mejores resultados.

2.6.4. Influencia/estudio de la aplicación de colores especiales en las gamas de colores

Los colores especiales son cada vez más demandados y las empresas desconocen todavía sus posibilidades de aumento de la gama de colores al utilizar este tipo de pigmentos. A este respecto, no existe un conocimiento exacto del comportamiento óptico y visual (McCamy 1998), o de apariencia de estos colores "de moda" (Deevi 1999), lo cual dificulta el control industrial eficaz de los mismos. Por lo que otra de las aplicaciones de este proyecto consistiría en realizar un análisis de la influencia de los colores fluorescentes, metalizados y perlados en el posible aumento de las gamas de colores industriales. Para ello procederíamos de la misma forma que en el estudio de las tecnologías de impresión. A partir de un conjunto de muestras proporcionadas por el empresario se procedería a la toma de medidas mediante el instrumento más adecuado y a la representación de las muestras en planos de claridad y tono constante para evaluar la influencia de estos colores en el aumento de la gama de color.

Con este estudio podríamos comprobar si al utilizar colorantes fluorescentes se sobrepasarían los límites de MacAdam debido a que se caracterizan por un factor espectral de radiancia superior a la unidad y observar si los cambios producidos en la gama de colores se deben a cambios en la claridad L^* , del croma C^* , o del tono, h^* , y a cuál de estas magnitudes afecta más.

Dicho estudio también se realizará con colores metálicos y perlados. Los colores metálicos se obtienen con láminas de pigmentos metálicos y se caracterizan porque cambian su luminosidad dependiendo del ángulo de visión. Mientras que los colores perlados se obtienen incorporando láminas de mica recubiertas con compuestos inorgánicos como el dióxido de titanio y se caracterizan por cambiar su tonalidad dependiendo del ángulo de visión. Veremos con cuál de estos tipos de pigmentos se aumenta en mayor medida la gama de colores, y analizaremos las diferencias en el aspecto de estas muestras dependiendo del ángulo de visión.

3. Originalidad y novedad de la propuesta

Este proyecto de tesis doctoral se puede extender a diferentes aplicaciones. Por una parte tiene una repercusión directa en la ciencia básica, es decir, en visión tanto natural como artificial. Y además podemos aprovechar esas implicaciones en ciencia aplicada ya que, con el método propuesto podemos realizar comparativas de gamas de colores de diferentes tecnologías de reproducción del color (industria textil, plásticos, pinturas, impresión...), las que nos permitirán valorar las capacidades de reproducción del color de los pigmentos utilizados actualmente y ayudar al empresario en la obtención de nuevos colorantes que amplíen la gama de color. Además se puede extender al estudio de las propiedades colorimétricas de los nanocolorantes para valorar de este modo sus capacidades de reproducción del color.

En primer lugar, pretendemos encontrar un nuevo método para calcular o analizar la gama de colores del ojo humano bajo cualquier iluminante o fuente de luz. Para ello desarrollamos un algoritmo de cálculo de colores óptimos partiendo del algoritmo original de MacAdam que nos permita visualizar el sólido de color de forma completa y aportar nuevos datos que pueden ampliar los datos presentes en la bibliografía actual. De dicho análisis podríamos extraer resultados sobre el número de colores distinguibles o perceptibles por el ojo humano, así como determinar qué iluminante o fuente real de luz nos permite una mayor gama de colores, pudiendo establecer así un método alternativo y novedoso para calcular el rendimiento colorimétrico de iluminantes o fuentes reales de luz respecto al que existe actualmente (CIE 13.3:1995).

Este método presentaría también una alternativa al cálculo de la gama de colores de dispositivos de captura donde

tradicionalmente se ha muestreado el espacio de todas las funciones de igualación teniendo en cuenta el metamerismo del dispositivo, pero sin tener en cuenta los colores óptimos, los cuales son realmente los bordes del sólido de color del dispositivo, como hemos indicado anteriormente. De este modo podríamos valorar cuántos estímulos “positivos” se quedan fuera del sólido de color, es decir, no son físicamente posibles.

Otra de las aplicaciones de este trabajo sería realizar comparativas entre visión del color de diferentes observadores. El algoritmo desarrollado puede aplicarse a cualquier observador, por lo que este análisis puede extenderse a visión anómala e incluso a visión animal. De esta forma podemos obtener datos sobre la visión de estos observadores y conocer sus capacidades de visión del color aplicando, si fuera posible, modelos de discriminación para cuantificar el número posible de colores distinguibles. La representación del sólido de color asociado a cada uno de ellos nos ayuda a establecer las diferencias o similitudes entre estos observadores y el observador estándar CIE-1931.

Una vez calculados los límites de la visión humana mediante nuestro algoritmo de colores óptimos, podemos analizar la gama de colores pertenecientes a diferentes tecnologías de reproducción. Desde que Pointer inició su trabajo en 1980 hasta ahora, han surgido nuevas tecnologías de reproducción del color. Debido a este hecho, nosotros seguimos el planteamiento desarrollado por Pointer de análisis de gamas de colores, pero extendemos dicho análisis a otras tecnologías no estudiadas por este autor, no desarrolladas en 1980, pero ahora en vigencia y algunas con gran éxito comercial. Se pretende comparar la gama de color perteneciente a diferentes sectores industriales con los límites del ojo humano para establecer si dicha gama se acerca a esos límites o si por el contrario puede ampliarse. Esto nos permite el estudio de nuevos colorantes o la utilización de nuevos sustratos para ampliar la gama de colores

existente hasta ahora, ampliable siempre a futuras tecnologías de reproducción del color partiendo de los mismos principios desarrollados aquí.

En resumen este proyecto de tesis doctoral pretende combinar:

- colorimetría básica
- visión/percepción del color
- tecnología del color

4. Resultados preliminares

Tras definir los diferentes aspectos que trataremos en este proyecto, pasamos a presentar algunos resultados preliminares. El inicio de este proyecto surge de la búsqueda de un nuevo algoritmo de cálculo de colores óptimos partiendo del algoritmo original de MacAdam. Debido a esto, en primer lugar mostraremos dicho algoritmo y los primeros resultados obtenidos en la búsqueda de colores óptimos, con el fin de comprobar si la forma del sólido de color cambia según la fuente luminosa utilizada y según el espacio de color en el que se trabaje. Además, mostramos una de las aplicaciones de este proyecto: el análisis de gamas de colores asociadas a diferentes tecnologías de color, en este caso la impresión. Como hemos comentado en secciones anteriores, el estudio de estas gamas de colores se hará también valorando la familia de colorantes primarios y la familia de sustratos utilizados. Por lo que en último lugar se mostrará un estudio sobre la gama de colores de un determinado tipo de impresión pero utilizando diferentes tipos de papel.

4.1. Cálculo del sólido de color según varias fuentes luminosas

MacAdam calculó el sólido de color asociado a diferentes iluminantes después de demostrar las características de los colores que formaban la frontera de dicho sólido (colores óptimos). Pero el algoritmo original de MacAdam (MacAdam, 1935), basado en el cálculo de la pureza colorimétrica, no busca sistemáticamente todos los colores óptimos del espectro visible para un factor de luminancia (Y) dado. En este trabajo presentamos un nuevo algoritmo de búsqueda sistemática de colores óptimos para cualquier iluminante ($F2$, $F7$, $F11$, $D50$, $D75$, etc.) e incluso para lámparas reales (de

descarga, fluorescentes, LED, etc.). El sólido de color es representado en diferentes espacios de color (CIELAB, SVF, DIN99d y CIECAM02), en planos horizontales (claridad constante) y planos verticales (ángulo-tono constante), con el fin de observar las diferencias existentes entre estos iluminantes. El sólido de color puede visualizarse de forma completa para observar cómo depende su forma en función del iluminante y el espacio de color utilizado. Además podríamos establecer un nuevo criterio de clasificación para las fuentes de luz teniendo en cuenta el volumen del sólido de color en espacios de color uniformes.

El algoritmo que presentamos, programable en cualquier software, se descompone en dos sub-algoritmos: uno para el cálculo de los colores óptimos tipo 1 y otro para los de tipo 2. Los datos iniciales que deben incluirse y fijarse son los siguientes:

- a. El intervalo o rango del espectro visible, por ejemplo, desde 380 a 780 nm.
- b. El muestro espectral, N , en este caso de 0.1 nm.
- c. Las funciones de igualación del observador patrón CIE-1931 XYZ (Wyszecki, 1982), con lo que deben interpolarse las tablas que se encuentran en la bibliografía (con $\Delta\lambda = 1$ nm), en este caso en pasos de 0.1 nm. Usando notación algebraica típica de colorimetría, denotaremos a las funciones de igualación CIE por $\bar{T} = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}]$. Se interpola linealmente debido a la suavidad en las curvas de las funciones de igualación.
- d. El espectro o distribución espectral de potencia radiante $\mathbf{S}(\lambda)$ del iluminante, tratado de igual forma que las funciones de igualación. De esta forma, si se desea obtener los colores óptimos bajo cualquier otro iluminante (A, D65, F2,..) que no sea el equienergético $\mathbf{E}(= [1,1,...,1]^t)$ se ponderan las funciones de igualación \bar{T} por el espectro \mathbf{S} del iluminante. En

notación algebraica supone sustituir $\bar{\mathbf{T}}$ por $[\bar{\mathbf{T}} \cdot \text{diag}(\mathbf{S})]$, siendo $\text{diag}(\mathbf{A})$ la matriz diagonal del vector \mathbf{A} cualquiera.

En este caso se ha realizado interpolación "spline" en lugar de interpolación lineal, como recomienda la CIE (CIE 167:2005), porque las curvas ya no son tan suaves. La interpolación "spline" o segmentaria consiste en usar segmentos de polinomios en lugar de un solo polinomio para interpolar los datos y unirlos adecuadamente para formar la interpolación. Se realiza interpolación spline cúbica, cuya función de interpolación viene dada por la Ecuación (21)

$$y = y_p + \frac{y_{p+1} - y_p}{x_{p+1} - x_p} (x - x_p) + A_p \frac{(x - x_p)^2 (x_{p+1} - x)}{(x_{p+1} - x_p)^3} + B_p \frac{(x - x_p)(x_{p+1} - x)^2}{(x_{p+1} - x_p)^3} \quad p = 1 \dots n \quad (21)$$

donde los coeficientes A y B se calculan igualando la primera y segunda derivada en el punto de abscisas x_{p+1} de la función de interpolación en el intervalo $[n, n+1]$.

Es decir, dado el conjunto $x = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n\}$ e $y = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_n\}$, una spline cúbica que interpola estos datos, es una función $s(x)$ definida como sigue:

$$s(x) = \begin{cases} s_0(x) & \text{si } x \in [x_0, x_1] \\ s_1(x) & \text{si } x \in [x_1, x_2] \\ \vdots & \\ s_{n-1}(x) & \text{si } x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (22)$$

donde:

- $s_i(x)$ es un polinomio cúbico
- $s_i(x_i) = y_i, \forall i = 0, 1, \dots, n$

- la primera y segunda derivadas de $s(x)$ son continuas en $[x_0, x_n]$.

Aplicando estos principios matemáticos a nuestros datos colorimétricos, la variable x es la longitud de onda y la variable y es la SPD o el espectro de la fuente luminosa o iluminante.

- e) El valor de claridad L^* , con un error de exactitud o tolerancia ΔL^* . Se introduce este dato inicialmente en lugar del factor de luminancia (Y) porque se analizará el sólido de color en planos de claridad constante. El valor de tolerancia ΔL^* nos garantiza que los colores óptimos encontrados para un cierto valor de claridad se distribuyan en un plano de claridad constante cuyo "espesor" no supera el valor de ΔL^* entre el color más claro y el más oscuro. Para calcular Y a partir de L^* se tiene en cuenta la fórmula completa $L^* = f(Y)$ tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$L^* = \begin{cases} 903.3 \frac{Y}{Y_n}, & \text{si } Y/Y_n \leq 0.008856 \\ 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16, & \text{si } Y/Y_n > 0.008856 \end{cases} \quad (23)$$

Con $Y_n = 100$ del iluminante, si $\Delta L^* = f(Y \pm \Delta Y) - f(Y) =$ cte, entonces:

$$\Rightarrow \Delta Y = \begin{cases} \frac{100}{903.3} \Delta L^*, & \text{si } Y(\%) \leq 0.8856 \\ 100 \left[\left(\frac{\Delta L^*}{116} + \left(\frac{Y}{100} \right)^{1/3} \right)^3 - \frac{Y}{100} \right], & \text{si } Y(\%) > 0.8856 \end{cases} \quad (24)$$

Con estos preliminares, para cada valor de claridad L^* fijado y bajo un iluminante dado, nuestro algoritmo encuentra las longitudes de onda de transición λ_1 y λ_2 , de paso de factor de reflexión o transmisión (de 0 a 1, o viceversa). Es decir, los colores óptimos obtenidos se diferencian en el centrado y la anchura pero no en su altura (siempre 0 ó 1), como se puede ver en la Figura 31.

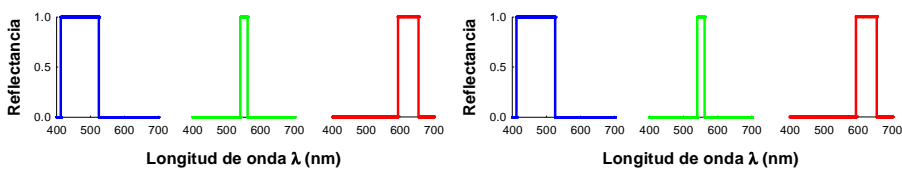


Figura 31. Seis ejemplos de colores óptimos (izquierda: tipo 1; derecha: tipo 2) que poseen el factor de luminancia $Y = 20$ bajo el iluminante equienergético E y el observador patrón CIE-1931 XYZ. Las longitudes de onda de transición λ_1 y λ_2 son, de izquierda a derecha, las siguientes: 412.1 – 525.2 nm, 540 – 562.0 nm, 594.0 – 654.7, 428.0 – 596.0 nm, 517.1 – 628.0 nm y 524 – 660.1 nm

Este algoritmo, tal como está diseñado, realiza una búsqueda sistemática de colores óptimos en el rango espectral seleccionado. Si el rango espectral elegido es, por ejemplo, de 380 a 780 nm en escalones de 0.1 nm, el algoritmo debe buscar todas las parejas (λ_1, λ_2) entre 8.002.000 combinaciones posibles que cumplan las condiciones colorimétricas impuestas. Evidentemente, esto para cada valor de claridad L^* y tipo de color óptimo supone un coste computacional considerable. Así por ejemplo, con el algoritmo implementado en Matlab, el tiempo medio estimado de cálculo para cada tipo de color óptimo y factor de luminancia es de aproximadamente una hora con un ordenador Pentium IV. Esto obviamente se debe principalmente al escalón de longitud de onda $\Delta\lambda$: si en vez de tomar $\Delta\lambda = 0.1$ nm se considera $\Delta\lambda = 1$ nm, la duración de cálculo disminuye significativamente pero a costa de reducirse bastante el número de colores óptimos encontrados, con lo cual la calidad del muestreo de los límites de MacAdam disminuye.

Nuestro algoritmo se reduce a calcular el valor triestímulo Y a partir de una pareja de longitudes de onda (λ_1, λ_2) y que éste se encuentre dentro del intervalo fijado por ΔL^* . Teniendo en cuenta que se trata de colores óptimos, donde su factor de reflectancia o transmisión únicamente puede ser cero o la unidad, por lo que pueden ser de tipo 1 o tipo 2, la condición impuesta para nuestro algoritmo viene dada por la Ecuación 25.

TIPO 1

$$Y = \frac{100}{(\bar{y}^t \cdot S)} \left[\sum_i^i \bar{y}'(\lambda_k) \right] \in [Y_o - \Delta Y, Y + \Delta Y] \quad (25)$$

TIPO 2

$$Y = \frac{100}{(\bar{y}^t \cdot S)} \left[\sum_{k=1}^i \bar{y}'(\lambda_k) + \sum_{k=j}^N \bar{y}'(\lambda_k) \right] \in [Y_o - \Delta Y, Y + \Delta Y]$$

donde, $\bar{y}' = \bar{y} \cdot \text{diag}(\mathbf{S})$ es la función de igualación $\bar{y}(\lambda)$ ponderada por el espectro del iluminante, e Y_o es el factor de luminancia calculado a partir del valor de claridad L^* definido inicialmente en la rutina.

En la siguiente figura se muestra un esquema del algoritmo implantado en el software Matlab, el programa calcula para cada pareja de longitudes de onda posibles el valor de luminancia (Y) según las ecuaciones anteriores.

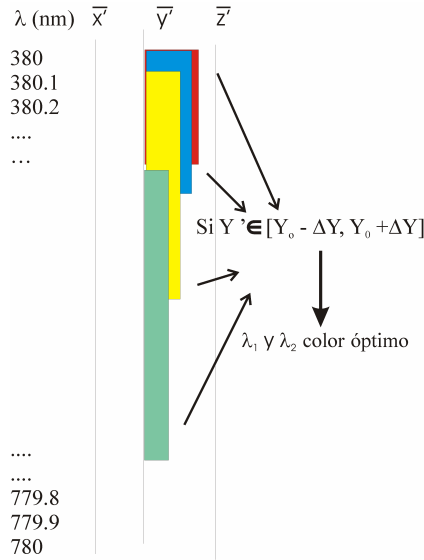


Figura 32. Esquema del algoritmo implementado en Matlab.

Con cada pareja obtenida de longitudes de onda de transición es muy fácil generar las reflectancias espectrales $\rho_{\text{óptimo}}(\lambda)$ de los colores óptimos y con éstas, junto con el espectro $S(\lambda)$ del iluminante, se pueden construir los estímulos-color óptimos para cualquier iluminante: $C_{\text{óptimo}}(\lambda) = \rho_{\text{óptimo}}(\lambda) \cdot S(\lambda)$ con el muestreo N . Obviamente, a partir de aquí es casi inmediato obtener los valores triestímulo XYZ a partir de las funciones de igualación T , y pasar a valores perceptuales en distintos espacios de color (Figura 33). En este trabajo se obtiene el sólido de color para los espacios CIEL*a*b*, SVF, DIN99d y CIECAM02.

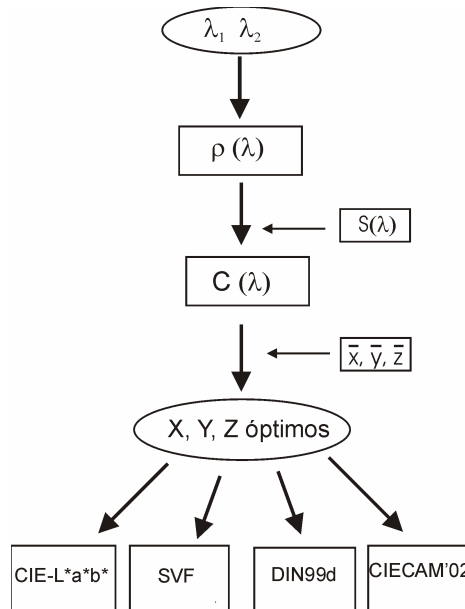


Figura 33. Esquema general

Las condiciones básicas de la escena de la que se pretende calcular su apariencia en cada uno de los espacios pueden esquematizarse como sigue:



Figura 34. Escena de la que se calcula su apariencia.

Nuestro algoritmo nos devuelve como resultados colores óptimos agrupados por el valor de L^* , o lo que es lo mismo por su factor de luminancia Y , dada la dependencia directa entre estas dos variables (Ecuación 23). A la hora de realizar los cálculos en otros espacios de color, se debe tener en cuenta que la variable equivalente a la claridad en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ no tiene por qué ser constante también para todo el grupo. Este es el caso del

espacio CIECAM02, donde J depende de la respuesta acromática del estímulo, pero no ocurre en otros espacios, porque la variable equivalente a la claridad únicamente depende del factor de luminancia Y . En todo caso, el algoritmo puede modificarse para calcular los colores estímulo en base a la claridad J de CIECAM02, a la claridad V de SVF, a la claridad L_{99d} de DIN99d, etc.

Para muestrear de forma uniforme el intervalo $]0,100[$ de claridad L^* , se ha tomado con un paso de 1. Como un ejemplo (Tabla 3), se muestra el número de colores óptimos encontrados para varios factores de luminancia según el algoritmo original de MacAdam (1935) y el propuesto por nosotros para el iluminante C, observándose la diferencia entre el número de colores óptimos con ambos métodos.

Tabla 3. Comparación entre los colores óptimos bajo el iluminante C y el observador patrón CIE-1931, obtenidos con el algoritmo original de MacAdam y nuestro algoritmo, con $\Delta\lambda = 0.1$ nm.

Y (aproximado al valor entero)	L*	Número de colores óptimos obtenidos			
		Algoritmo de MacAdam		Algoritmo propuesto	
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2
1	9	-	-	1034	1051
10	38	8	7	1383	891
20	52	8	8	645	681
50	76	12	12	814	919
70	87	12	12	1090	1342
90	96	8	11	3935	4320

Otro aspecto que cabe destacar también tras la tabla anterior es que el número de colores óptimos encontrados sistemáticamente con nuestro algoritmo depende del valor que tome L^* (Figura 36), así como del error de tolerancia ΔL^* , que en nuestro caso fue de

0.01. Si el valor ΔL^* es muy pequeño, por ejemplo menor que 0.005, el número de colores óptimos disminuirá bastante, lo cual restará eficacia a la hora de dibujar exactamente los locus de MacAdam. Pero si este mismo parámetro es grande, por ejemplo mayor que 0.5, el número de colores óptimos se agruparán en mini-curvas con lo que la representación global de los locus de MacAdam aparecerá ligeramente escalonada, con lo cual disminuirá la calidad gráfica.

Por tanto, después de haber probado varios valores de error de tolerancia ΔL^* hemos considerado que el más adecuado es $\Delta L^*=0.01$. Esta acotación de la claridad garantizará que el trazado del locus de MacAdam en cada plano de claridad será lo suficientemente suave para que no surja sesgado ni la necesidad de interpolar linealmente por falta de puntos.

Sólido de color en planos de claridad constante

Como ya hicimos notar antes, en la bibliografía actual no existen datos de colores óptimos asociados a factores de luminancia (Y) inferiores a 10 ni superiores a 95. En cambio, con este algoritmo se puede ampliar el número de colores óptimos ya conocidos y encontrar otros nuevos para cualquier factor de luminancia, desde 0 hasta 100.

Tras observar la tabla anterior se puede ver que, con nuestro algoritmo, los límites de MacAdam se podrán delimitar mucho mejor que con el algoritmo original de MacAdam, sin interpolación gráfica, como se observa en la Figura 35.

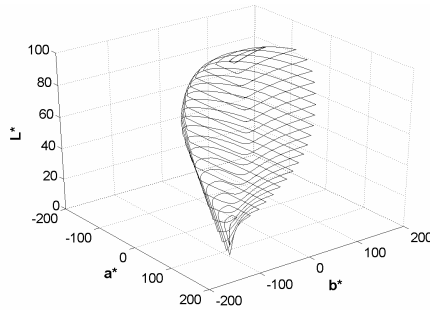


Figura 35. Sólido de color de Rösch-MacAdam en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ para el iluminante D65. El paso de ΔL^* es de 5 entre los planos de claridad L^* de 1 a 100 para evitar aliasing.

Se observa que el muestreo de la curva, límite de MacAdam, depende del factor de claridad L^* , es decir, el muestreo de los colores óptimos por cada plano de claridad constante no es uniforme en todos los cuadrantes del diagrama cromático. Para valores de claridad altos y muy bajos el muestreo es homogéneo en todos los cuadrantes, sin embargo para valores de claridad intermedios se observa que no es tan homogéneo, sobre todo para el cuadrante de los rojos-amarillos como puede verse en la Figura 36.

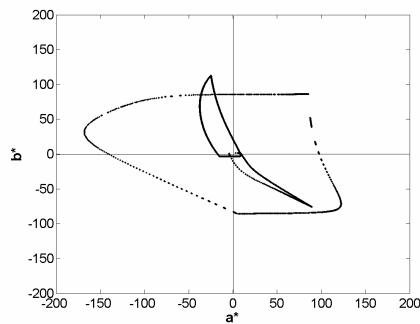


Figura 36. Efecto del factor de luminancia Y en el muestreo del locus de MacAdam: los locus más pequeños corresponden a $L^*=1$ y $L^*=98$, mientras que el más grande corresponde a $L^*=50$.

Como la claridad L^* puede seleccionarse dentro del intervalo $]0,100[$, la figura completa del sólido de color puede obtenerse para

cualquier iluminante o fuente de luz. La Figura 37 muestra el sólido de color en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ para los iluminantes fluorescentes F2, F7 y F11. Como puede verse, la forma del sólido de color depende del iluminante. Se observa claramente que la forma del sólido de color para el iluminante F11 es bastante diferente del resto. Con lo cual, quizás el número de colores distinguibles según cada iluminante (relacionado con el volumen del sólido de color) se podría utilizar para calcular el rendimiento de color de fuentes luminosas de forma alternativa al método propuesto por la CIE.

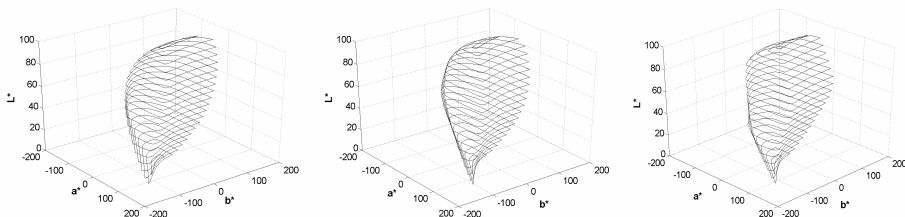


Figura 37. Sólido de color de Rösch-MacAdam en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ para tres iluminantes fluorescentes: F2 (izquierda), F7 (centro) y F11 (derecha). El paso ΔL^* es el mismo que en la Figura 35

En la siguiente figura se muestra el sólido de color para tres lámparas reales (CIE 15:2004) como son: la lámpara de sodio de alta presión (HP1), la lámpara de sodio de alta presión mejorada colorimétrica (HP2) y la lámpara de metal halido de alta presión (HP3), observándose que el sólido de color para la HP1 es muy diferente al resto.

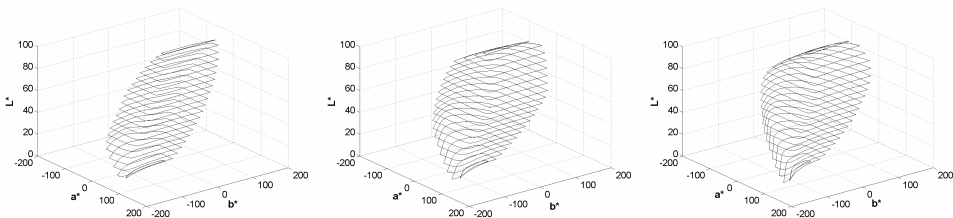


Figura 38. Sólido de color de Rösch-MacAdam en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ para tres lámparas reales: HP1 (izquierda), HP2 (centro) y HP3 (derecha). El paso de ΔL^* es el mismo que para las figuras anteriores.

Se ha calculado el sólido de color para otros espacios, como son el SVF, el DIN99d y el CIECAM02. Se observa claramente la diferencia entre los distintos sólidos ya que, estos últimos tienen una estructura más uniforme (Figura 39). También se observa que en el espacio de color SVF el sólido de color no se cierra tanto en el vértice del negro perceptual como en el vértice del blanco perceptual, como ocurre en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$.

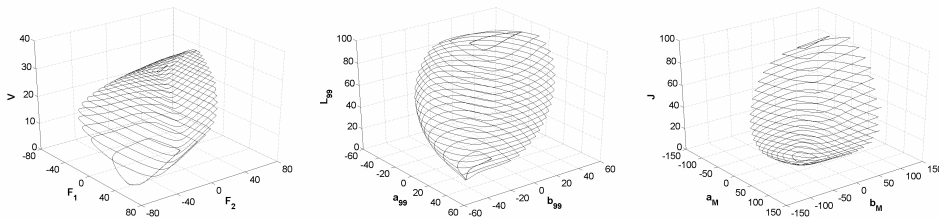


Figura 39. Sólidos de color para un observador patrón de 2° y bajo el iluminante D65 en distintos espacios de color perceptuales: SVF (izquierda), DIN99d (centro) y CIECAM02 (derecha).

Sólido de color en planos de tono constante

Como se ha dicho anteriormente, en este trabajo también se presenta un método para representar el sólido de color en planos de tono constante. El método consiste básicamente en barrer el sólido de color variando el ángulo-tono, es decir, diseccionar el sólido de color en perfiles verticales de tono constante, y no horizontales, que son los de claridad constante. Por tanto, se intenta presentar el sólido de color (a^* , b^* , L^*) en perfiles de tono constante con ejes C^* vs. L^* . Para calcular las coordenadas a^* y b^* , es necesario obtener previamente el croma en función del ángulo-tono h_{ab}^* , $C_{ab}^* = f(h_{ab}^*)$, teniendo que interpolar en ocasiones, tal como puede verse en la Figura 40. En este caso se ha realizado interpolación lineal, a pesar de no tratarse de curvas muy suaves, ya que la interpolación spline no presenta buenos resultados en los extremos. En estudios futuros, pretendemos implementar el

algoritmo de interpolación Sprague propuesto por la CIE (CIE 167:2005). Así pues, se toman 120 valores de ángulo-tono, entre 0 y 360, en intervalos de 3 grados, ya que un cambio de 3 grados nos asegura coger aproximadamente tonos Munsell distintos (Pointer, 1980), incluso en los espacios de color SVF, DIN99d y CIECAM02. Una vez considerado esto, se interpola para encontrar el valor de C^* correspondiente al ángulo-tono elegido y a partir de éste se obtienen a^* y b^* y se realiza la representación gráfica.

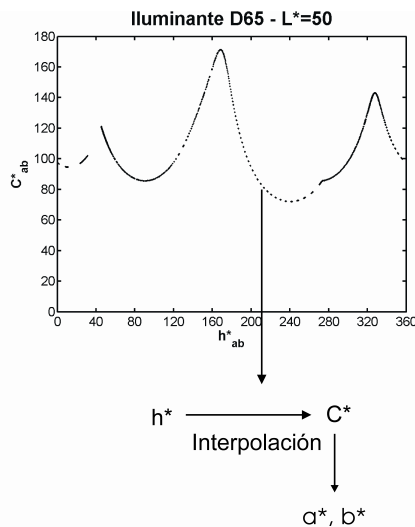


Figura 40. Esquema del método de cálculo de las coordenadas a^* y b^* a partir de C^* y h^* .

Este procedimiento es el mismo para todos los espacios de color, teniendo en cuenta que para los tres citados anteriormente ya no hablamos de croma, sino de colorido. En el espacio CIECAM02 se toma la variable M y sus correspondientes coordenadas a_M y b_M y el ángulo-tono definido en dicho espacio. Para los otros espacios se calcula el ángulo-tono y el colorido como en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ (Ver anexo).

El sólido de color para los distintos espacios se muestra en la Figura 41, donde se representa el sólido para los iluminantes D65, F11 y la lámpara real HP1. También se puede observar las

diferencias en la forma del sólido, tal como sucede cuando se representa en planos de claridad constante.

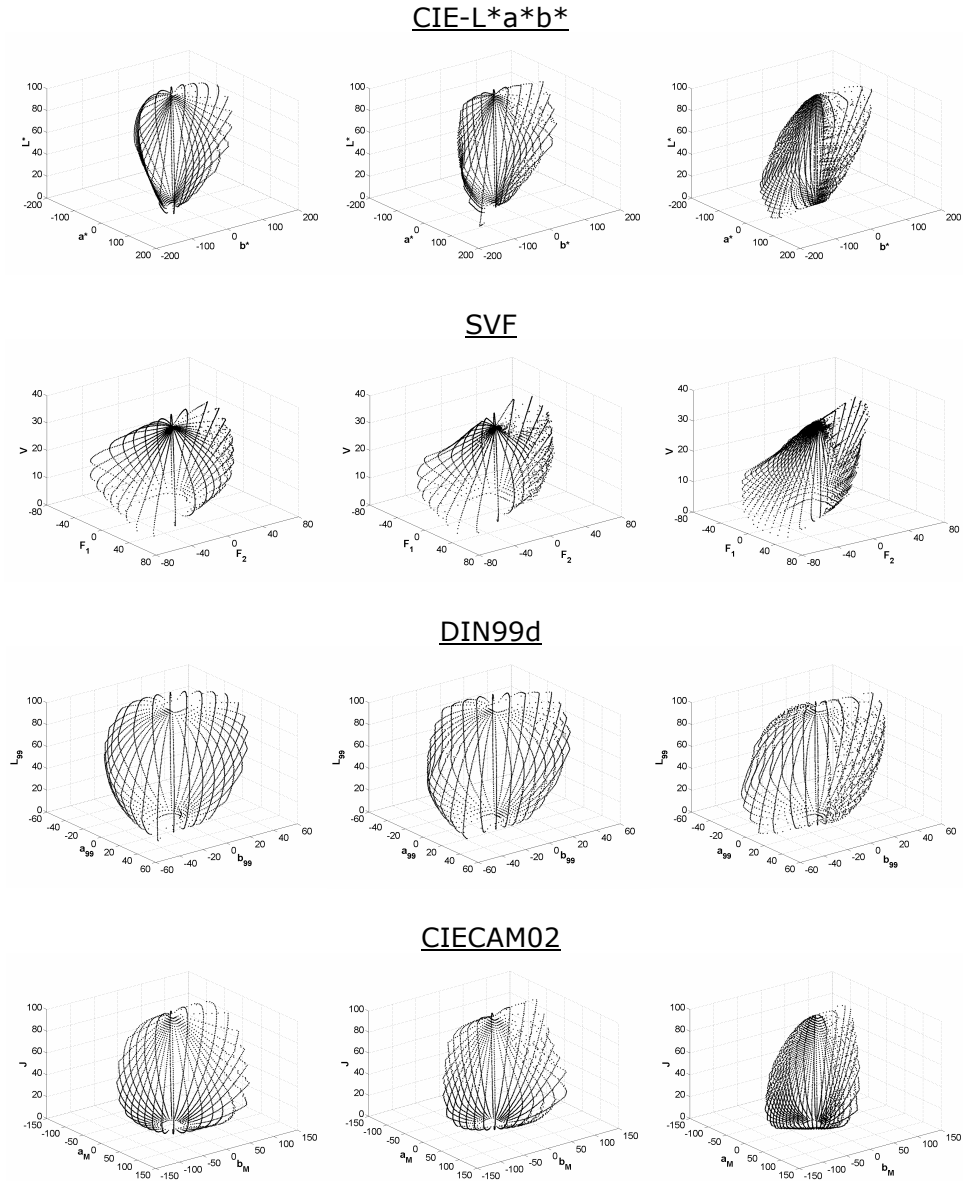


Figura 41. Sólido de color de Rösch-MacAdam bajo los iluminantes D65, F11 y la lámpara real HP1, en los espacios CIE-L*a*b*. SVF, DIN99d, y CIECAM02 respectivamente. Se han tomado 60 perfiles de 120 para evitar aliasing.

Representando todo el sólido al completo, las diferencias entre los sólidos para distintos iluminantes son muy sutiles y difíciles de apreciar (Figura 41). Debido a esto se opta por una nueva representación para valores discretos, donde se comparan sólidos de color para distintos iluminantes y diferentes fuentes de luz, observándose mejor las diferencias.

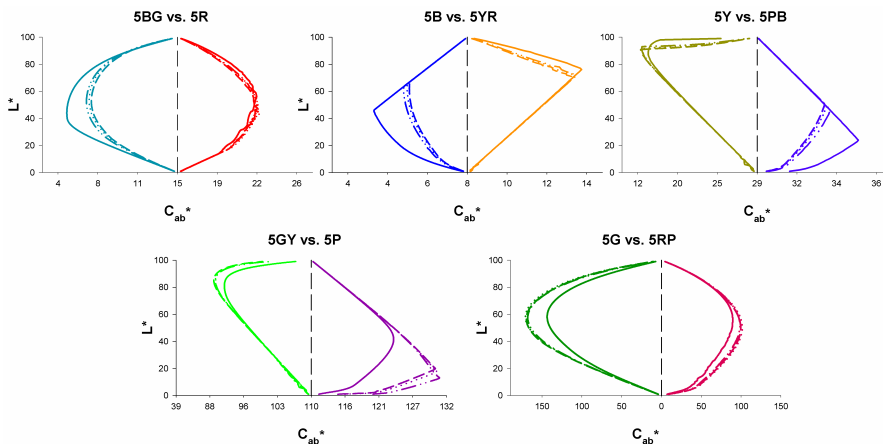


Figura 42. Sólido de color de Rösch-MacAdam bajo varios iluminantes en el espacio CIE- $L^*a^*b^*$ (C_{ab}^* , L^*). Diagrama: (A (línea sólida), E (línea de guiones), C (línea de puntos), D65 (línea de puntos y guiones).

En este primer grupo se comparan los iluminantes de espectro continuo, observándose que el iluminante A es el que más se diferencia de todos. Esto era de esperar ya que su cromaticidad es distinta a la de los demás iluminantes, más amarillenta respecto a la blanco-azulado de los otros. Así podemos apreciar que en los tonos azulados, verdosos, púrpuras y verde-azulados es donde los iluminantes presentan más diferencias, ya que las curvas se alejan más unas de otras.

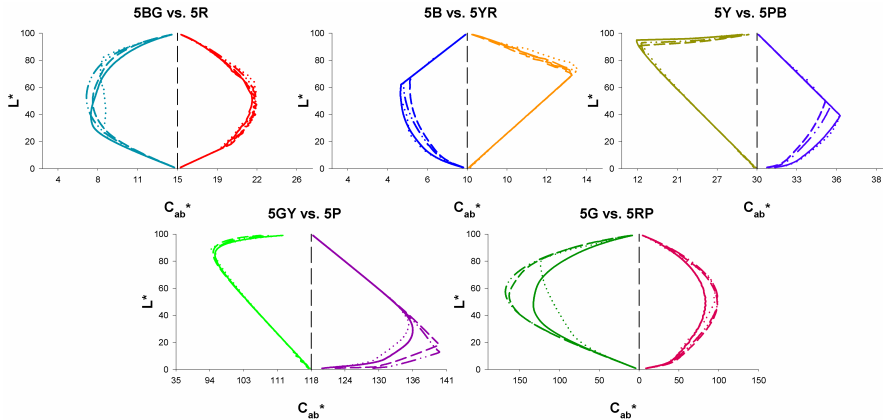


Figura 43. Sólido de color de Rösch-MacAdam (C_{ab}^* , L^*). Diagrama: (F2 (línea sólida), F7 (línea discontinua), F11 (línea de puntos), E (línea discontinua con puntos)).

En este segundo grupo, se realiza la comparación entre iluminantes fluorescentes, F2, F7 y F11, dejando como referencia el iluminante equienergético E. En este grupo, el iluminante que más se diferencia es el iluminante F11, lo que ya se observaba cuando se realizó la representación del sólido de color tanto en perfiles de claridad constante, como de ángulo-tono constante para dicho iluminante. Se puede ver el efecto cintura que aparece en los tonos B y BG, que no se presenta en los otros iluminantes estudiados.

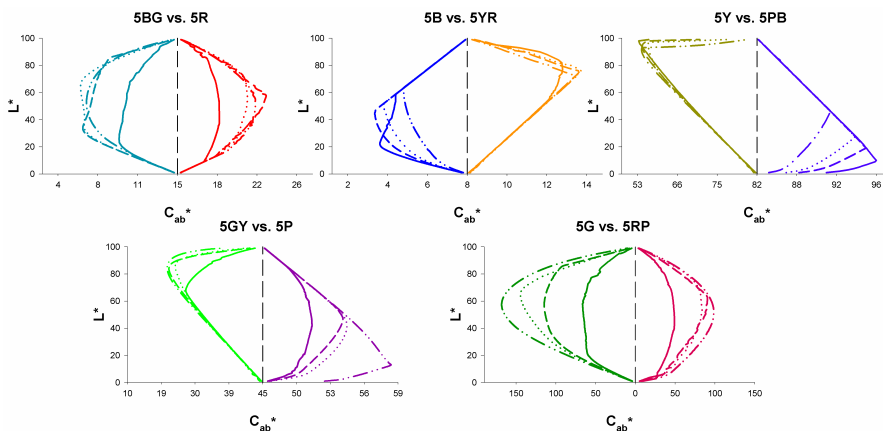


Figura 44. Sólido de color de Rösch-MacAdam (C_{ab}^* , L^*). Diagrama: (HP1 (línea sólida), HP2 (línea discontinua), HP3 (línea de puntos), E (línea discontinua con puntos)).

En este último grupo, se realiza la comparación entre tres lámparas reales, HP1, HP2 y HP3, teniendo como referencia el iluminante E. La lámpara HP1 es la que presenta en todos los tonos estudiados diferencias significativas respecto al resto. Se comprueba que para dicha lámpara el número de colores distinguibles se reduce considerablemente en los perfiles 5BG-5R, 5GY-5P y 5G-5RP.

Estos perfiles también pueden obtenerse para los otros espacios de color, considerando en cada espacio las variables correspondientes: SVF (C,V), DIN99d (C₉₉, L₉₉), y CIECAM02 (M, J).

A continuación se muestran las representaciones en el espacio CIECAM02 para observar si tales diferencias también se presentan en este espacio, o son menores al tratarse de un espacio más uniforme. Se realizan las mismas comparaciones que en el caso del espacio de color CIE-L*a*b*: un primer grupo que comprende los iluminantes de espectro continuo (A, C, D65, E), el segundo los iluminantes de tipo fluorescente (F2, F7, F11), comparados con el iluminante equienergético E y un tercer grupo con lámparas reales (HP1, HP2, HP3), también frente al iluminante equienergético E.

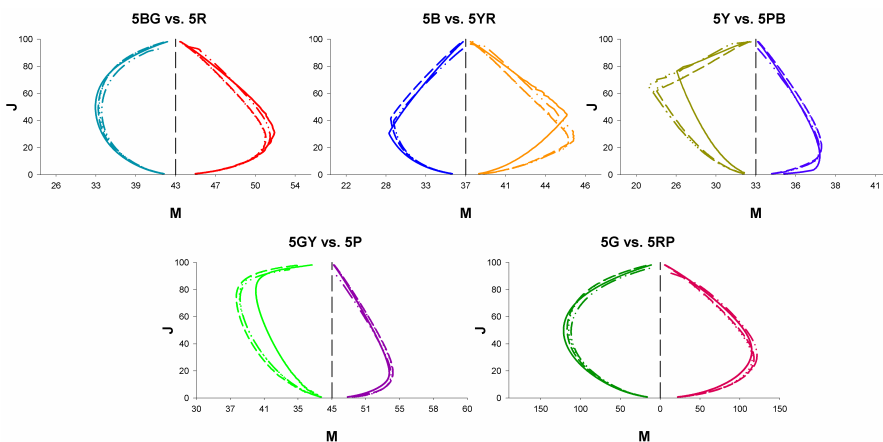


Figura 45. Sólido de color de Rösch-MacAdam bajo varios iluminantes en el espacio CIECAM02 (M, J). Diagrama: (A (línea sólida), C (línea discontinua), D65 (línea de puntos), E (línea discontinua con puntos).

En este espacio de color también se observa que el iluminante A es el que más se diferencia del resto, pero hay que destacar que las diferencias entre los distintos iluminantes son menores que en el espacio CIE-L*a*b* (Figura 42). También se observa que existen diferencias entre este espacio y el espacio CIE-L*a*b*. Comparando las Figuras 42 y 45 comprobamos que los ángulos-tono en los que se encuentran mayores diferencias no son los mismos. Para el espacio CIECAM02 son los verde-amarillentos, amarillos y rojo-anaranjados mientras que en el espacio CIE-L*a*b* están en los azules y púrpuras.

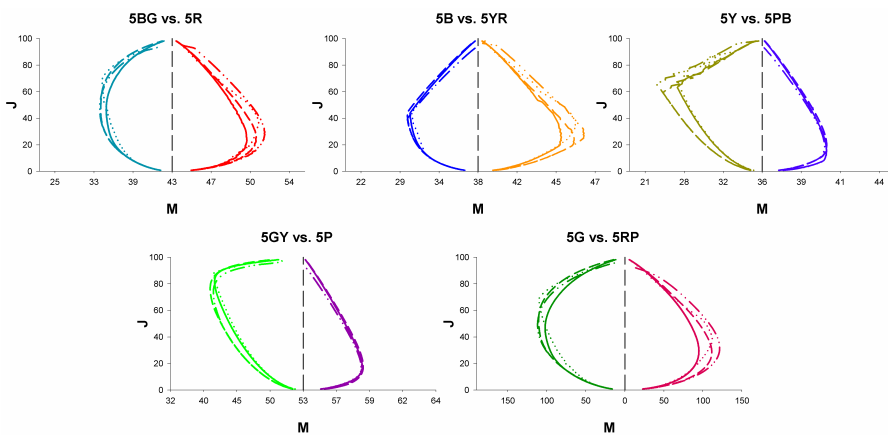


Figura 46. Sólido de color de Rösch-MacAdam bajo varios iluminantes en el espacio CIECAM02 (M, J). Diagrama: (F2 (línea sólida), F7 (línea discontinua), F11 (línea de puntos), E (línea discontinua con puntos)).

Para este segundo grupo las diferencias son menores, el iluminante F11 ya no presenta el efecto cintura que se veía al realizar la representación en el espacio CIE-L*a*b*, sobretudo en los perfiles 5B y 5BG (Figura 43). Por lo que podemos afirmar que la uniformidad de este espacio de color se refleja también en la forma del sólido de color ya que, como hemos observado presenta una forma más homogénea para todos los iluminantes o lámparas reales estudiadas.

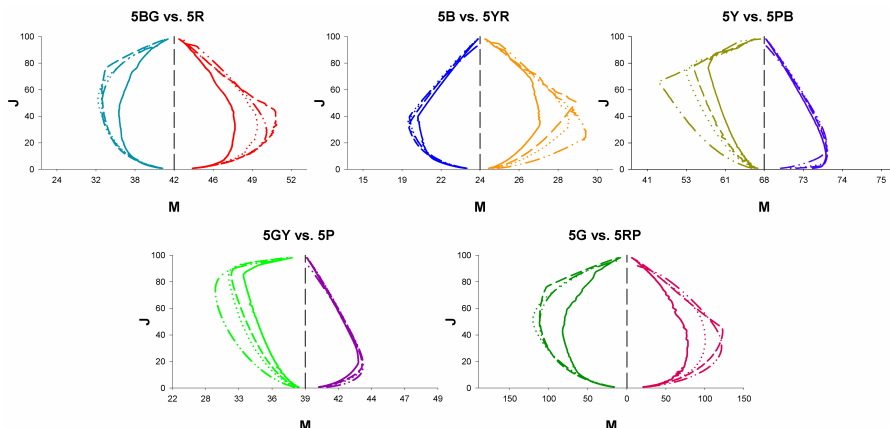


Figura 47. Sólido de color de Rösch-MacAdam bajo varios iluminantes en el espacio CIECAM02 (M, J). Diagrama: (HP1 (línea sólida), HP2 (línea discontinua), HP3 (línea de puntos), E (línea discontinua con puntos)).

Al igual que ocurre en el espacio de color CIE- $L^*a^*b^*$, la lámpara real HP1 es la que presenta límites más diferentes, aunque en el espacio CIECAM02 las diferencias son menos acentuadas. Nuevamente, en el espacio CIECAM02 cambian los tonos respecto al espacio CIE- $L^*a^*b^*$, como ocurría en los iluminantes de espectro continuo y de tipo fluorescente.

Una vez analizados los resultados obtenidos con cada uno de los iluminantes, podemos extraer las siguientes conclusiones de este apartado:

- Hemos actualizado el algoritmo de cálculo de colores óptimos que delimitan el sólido de color, mejorando el muestreo obtenido por el algoritmo propuesto originalmente por MacAdam. El sólido de color puede ser representado en cualquier espacio de color, lo que amplía la base de datos actual de la colorimetría.
- Una vez representado el sólido de color para distintos iluminantes, se observa claramente que la forma del sólido depende del iluminante, independientemente del espacio de color en el que se trabaje. Se ha comprobado,

a partir de los perfiles de tono constante, que para el grupo de iluminantes de espectro continuo, el iluminante más diferente al resto es el iluminante A. Para el grupo de iluminantes de tipo fluorescente, el iluminante F11 presenta diferencias significativas con el resto, lo que se comprueba al representar el sólido de color completo tanto en perfiles de claridad constante como de ángulo-tono constante. En la comparativa entre distintos tonos se observa más claramente debido al efecto cintura que aparece en algunos ángulos-tono. Y en el último grupo donde se comparan distintas lámparas reales, el sólido de color para la lámpara de sodio de alta presión (HP1) es el más diferente al resto de las lámparas, e incluso la forma del sólido de color para dicha lámpara es la más peculiar entre todos los iluminantes estudiados. Por lo que podría concluirse que el número de colores distinguibles, dado un factor de luminancia, depende del iluminante considerado, hecho que debería tenerse en cuenta al realizar estudios de gamas de colores.

- También se ha observado la mejor uniformidad de los espacios de color perceptuales más actuales, como el DIN99d y el CIECAM02 frente al más tradicional CIE-L*a*b*. El sólido de color obtenido en este espacio presenta una forma más irregular que la que se obtiene en otros espacios, donde el sólido de color tiende a parecerse a una esfera.

4.2. Comparativa de las gamas de colores de varias tecnologías de impresión

En este apartado se presenta una de las aplicaciones de este trabajo: se ha desarrollado un método que nos permite realizar un estudio sobre las gamas de colores pertenecientes a distintas tecnologías de reproducción del color. Consiste en realizar una comparación entre distintas gamas de colores basada en la representación de los colores reproducidos por cada una de las tecnologías en planos de claridad L^* y tono h_{ab}^* constantes tras haber medido cartas de caracterización. Este método nos permite el análisis de las gamas de color atendiendo tanto a la comparación de dichas gamas y los límites de MacAdam, así como al análisis de la distribución de los colores reproducidos en el sólido de color, es decir, si se trata de una distribución homogénea o deja ciertas regiones sin cubrir, bien por razones comerciales o bien por razones de diseño.

En este caso se comparan distintas tecnologías de impresión, siendo seleccionadas las siguientes: impresión láser (HP 4600 Laserjet), de chorro de tinta (HP 1220 Inkjet), e impresión offset (Heildberg GTO) (Figura 48).



Figura 48. Tecnologías de impresión utilizadas. Láser: HP 4600 Laserjet (izquierda), Chorro de tinta: HP 1220 Inkjet (centro), offset: Heildberg GTO 52 (derecha).

Para que la comparación entre las gamas de color resulte lo más homogénea posible, es decir, que las condiciones de impresión

sean las mismas para las tres tecnologías de impresión, usamos como sustrato papel con un gramaje de 100 g/m² y con un acabado mate. Además decidimos imprimir la carta ECI 2002 CMYK tanto para la impresión láser como para la offset. Para la impresión de chorro de tinta seleccionamos la carta TC9.18. RGB con la finalidad de beneficiarnos del modelo de conversión de RGB a CMYK propio de este dispositivo de impresión.

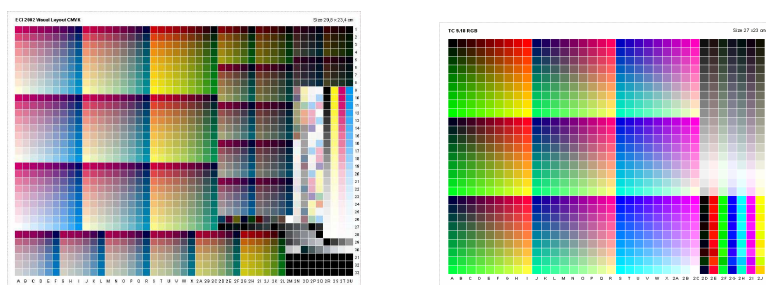


Figura 49. Carta de color ECI 2002 CMYK utilizada para impresión láser y offset (izquierda). Carta de color TC9.18.RGB para impresión chorro de tinta.

La reflectancia espectral de las muestras de cada carta de color fue medida con el espectrofotómetro Minolta CM-2600d (geometría d/8) controlado con el software SpectraMagic 3.6. El instrumento proporciona muchas posibilidades de medida como pueden ser: con o sin iluminación ultravioleta, con componente especular incluida o excluida, etc. Para este estudio se han utilizado los datos obtenidos con componente especular incluida (SCI) y sin iluminación ultravioleta, de esta manera se simula lo mejor posible las condiciones habituales de observación de las muestras. De entre las opciones posibles que facilita el software, como observador patrón (2° o 10°), espacios de color (XYZ, L*a*b*C*h*, etc) y de iluminantes (D65, fluorescentes tipo F, etc), se trabaja en el espacio de color CIE-L*a*b* bajo luz de día (D65) y con observador patrón 2°.



Figura 50. Espectrofotómetro Minolta CM-2600d sobre una de las cartas de caracterización medidas.

Aunque disponemos del espectrofotómetro GretagMacbeth EyeOne (geometría 45/0) configurado para dar a la salida datos en formato CIELAB bajo el iluminante D50, hemos preferido utilizar el espectrofotómetro Minolta ya que nos permite obtener directamente las curvas de reflectancia espectral y a partir de ellas trabajar en cualquier espacio de color (CIE-XYZ, CIE-L*a*b*C*h*, etc.) y para cualquier iluminante.

Las muestras coloreadas se representan en perfiles o planos de claridad L^* y ángulo-tono h_{ab}^* constantes teniendo en cuenta los límites de MacAdam asociados al iluminante D65. Es decir, los datos CIELAB asociados a todas las muestras impresas se ordenan en orden creciente de claridad L^* para agruparlos a continuación en planos de claridad constante con un margen de $\Delta L^* = \pm 5$. Y, por otro lado, los datos CIELAB obtenidos se ordenan también en orden creciente de ángulo-tono h_{ab}^* para agruparlos a continuación en planos de tono constante teniendo en cuenta el margen existente entre los tonos principales del atlas Munsell (5R, 5YR, 5Y, etc).

La Figura 51 muestra la comparación entre las gamas de color de las tres tecnologías de impresión para distintos valores de claridad. Se eligen perfiles distintos de L^* (20, 40, 60, 80), con el fin de representar colores muy oscuros, de claridad intermedia y claros.

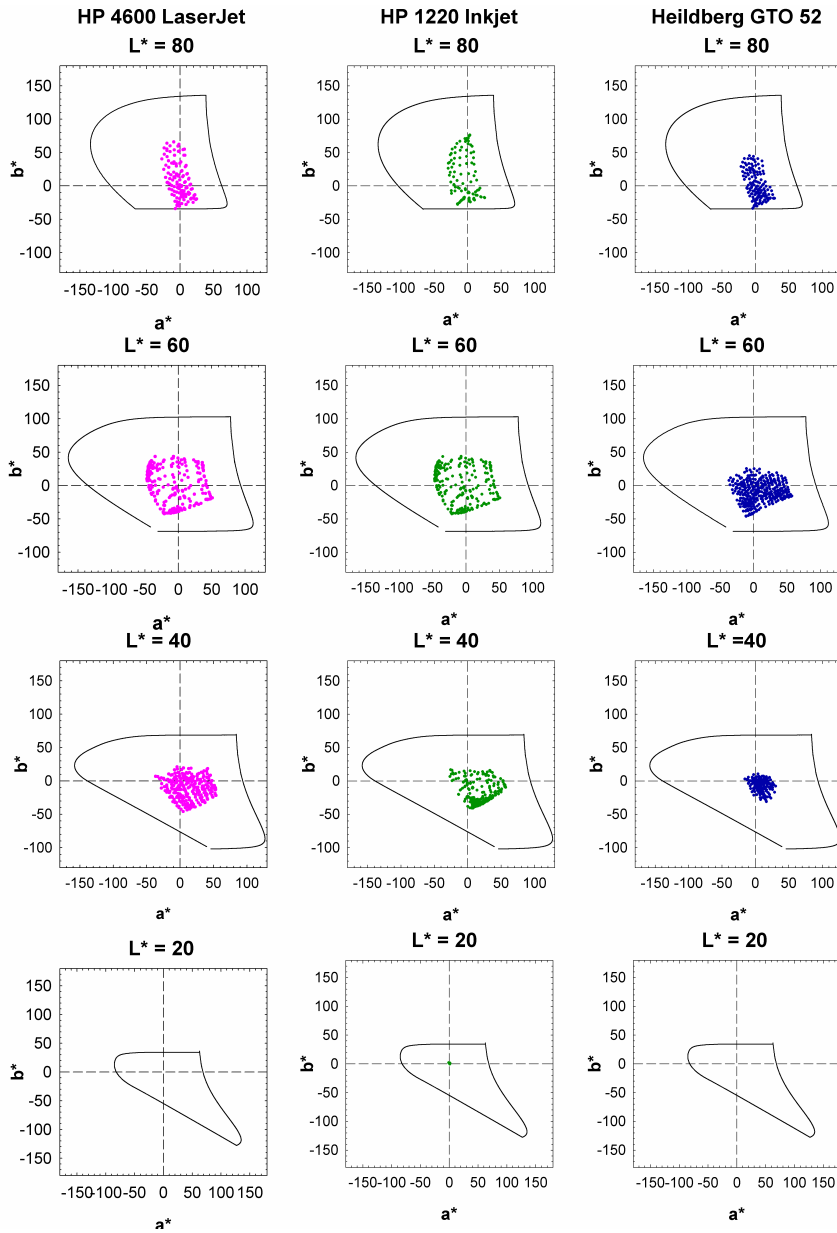


Figura 51. Comparación de la gama de colores pertenecientes a las tres tecnologías de impresión para diferentes valores de claridad ($L^* = 20, 40, 60, 80$).

En la siguiente figura se representan otros perfiles diferentes, obteniendo colores oscuros, de claridad intermedia y muy claros, $L^* = 30, 50, 70, 90$.

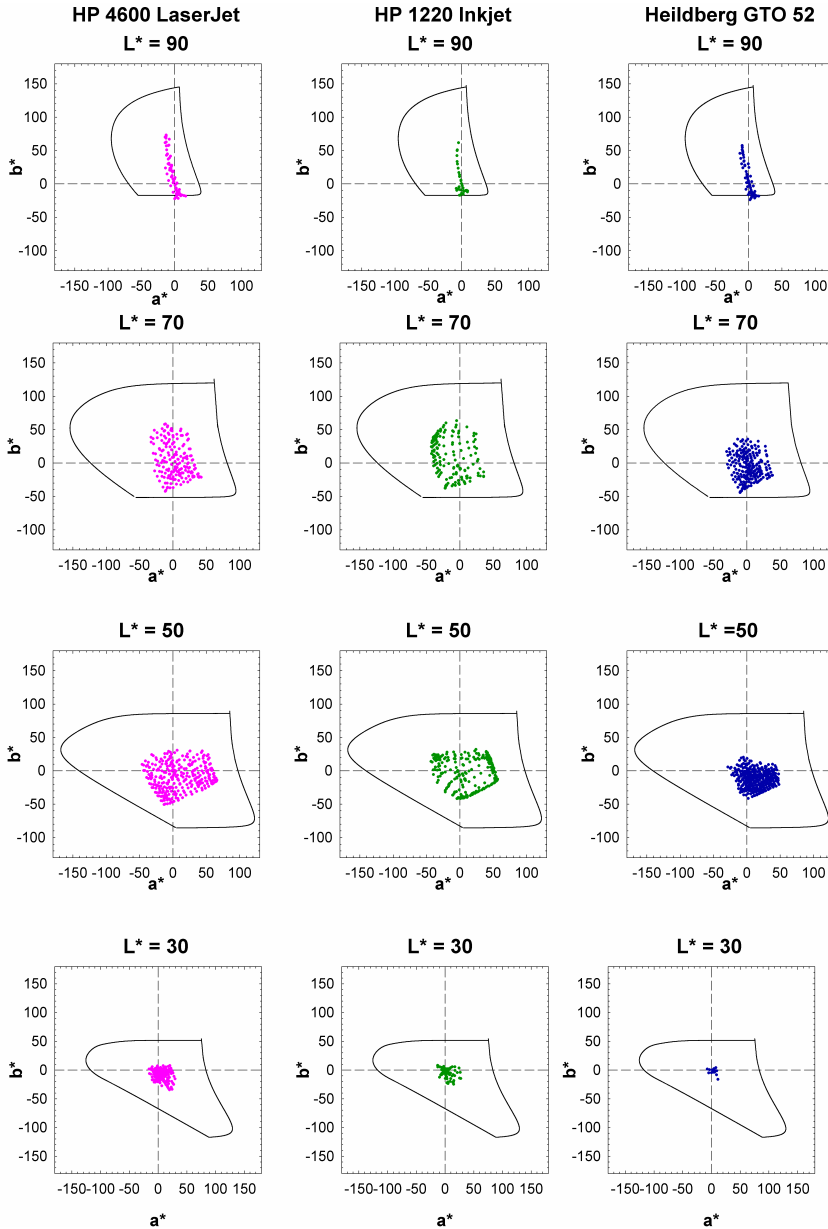


Figura 52. Comparación de la gama de colores pertenecientes a las tres tecnologías de impresión para diferentes valores de claridad ($L^* = 30, 50, 70, 90$).

Podemos ver que ninguna de las tres tecnologías de impresión alcanza los límites de MacAdam, especialmente para valores altos y bajos de claridad. Comparando entre las tres impresoras, es obvio que el mejor comportamiento es el de la impresora láser, a pesar

que la impresora de chorro de tinta presenta colores más oscuros que las otras dos tecnologías de impresión, pero la láser reproduce colores que cubren el sólido de color de forma más homogénea. Después le sigue la impresora de chorro de tinta, aunque la carta TC9.18 RGB no cubre homogéneamente cada sub-gama de color de esta impresora. La impresión offset es la que tiene una gama de color más reducida, especialmente para colores oscuros. Quizás usando papel de acabado brillo y con un gramaje superior a 100 g/m², la gama de color de esta impresora podría ampliarse.

Podemos decir que para los planos de claridad intermedia ($L^* = 40$) se reproducen bastantes colores rojos-azulados, sin embargo no se tienen colores verdes o verdes-azulados para ninguna de las impresoras. Para impresión offset, cabe destacar que se reproducen sobre todo colores rojo-azulados, mientras que las otros tipos de impresión presentan más azules, verdes y rojo-amarillentos. Para los planos de claridad alta los tres tipos de impresión reproducen muy pocos colores, todos ellos con muy bajo croma y lo mismo ocurre para planos de claridad baja.

Como hemos dicho anteriormente, también realizamos la representación de todos los colores reproducidos por estos dispositivos en planos de tono constante teniendo en cuenta el atlas Munsell, este análisis también nos ayuda a establecer que tecnología de impresión presenta mejores resultados en cuanto reproducción del color.

Se muestran los diez tonos principales del atlas Munsell, presentándose a continuación una gráfica que muestra los resultados, donde se dibujan de dos en dos, los tonos BG-R, B-YR, Y-PB, GY-P y G-RP.

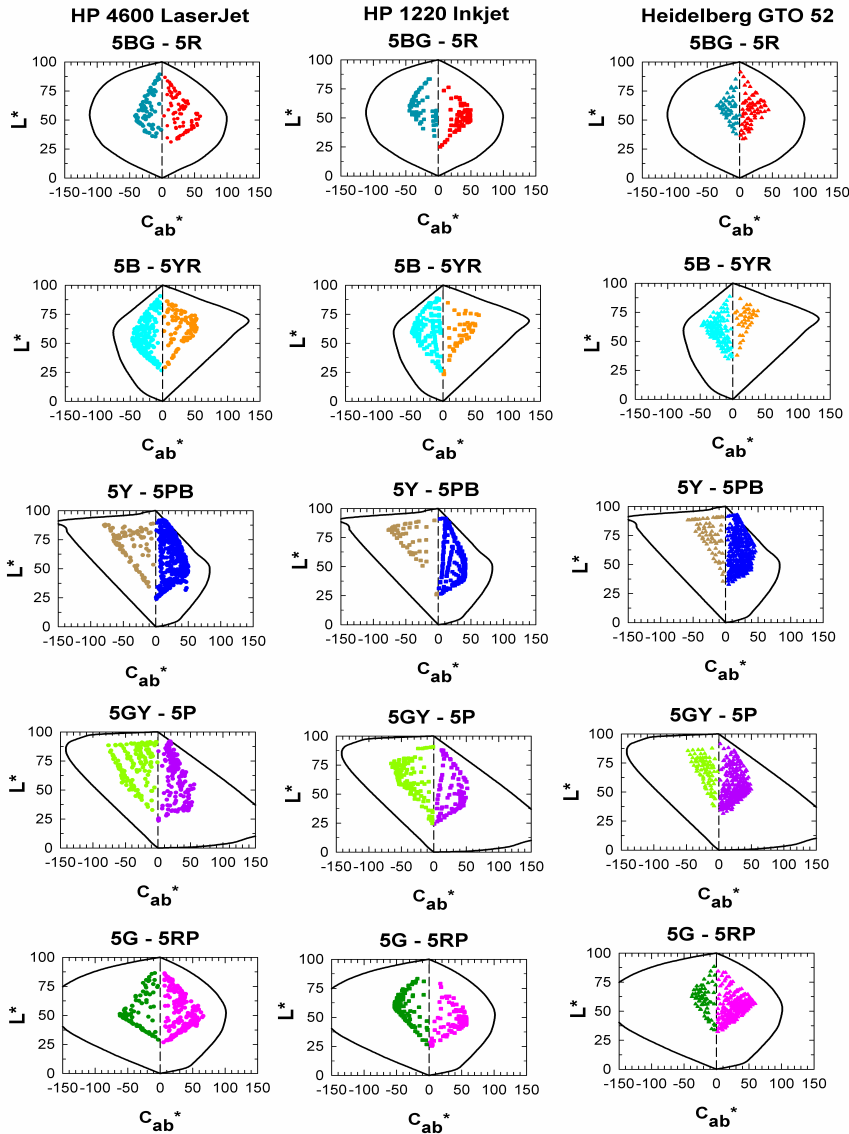


Figura 53. Comparativa entre los tres tipos de impresión en planos de tono h_{ab}^* constantes.

La Figura 53 muestra la gama de color de las tres tecnologías de impresión dentro del margen de los tonos principales del Munsell. Como puede verse, en estos planos tampoco alcanza ninguna de ellas los límites de MacAdam. En general, los tonos azules (B) y los púrpura-azulados (PB) son cubiertos bastante bien por los tres tipos de impresión. Pero para los tonos verdosos (G) y

púrpuras (P) se cubre peor la zona delimitada por los límites de MacAdam. Hay que destacar que ninguna de las tres tecnologías de impresión reproduce muy bien el negro, en todas ellas no hay colores con un valor de claridad inferior a 20, lo que podría deberse al tipo de sustrato utilizado, papel mate de 100 g/m². Si se hubiese elegido por ejemplo un papel brillante o con mayor gramaje podríamos haber obtenido colores más oscuros así como una mejor reproducción del negro. También podemos ver que con los tres tipos de impresión, la zona cerca al eje acromático no está muy bien muestreada existiendo pequeñas zonas vacías, esto puede verse particularmente para la impresión de chorro de tinta.

Comparando ahora los tres tipos de impresión observamos nuevamente que la impresión láser ofrece mejores resultados en cuanto a reproducción del color. Reproduce una gama de colores que se distribuyen de forma más homogénea, cubriendo bastante bien la región delimitada por los límites de MacAdam, hecho que se pone de manifiesto en todas las tonalidades representadas, como podemos ver en la Figura 53. Le sigue en el ranking la impresora de chorro de tinta y por último la impresión offset, a pesar de que la impresión de chorro de tinta deja más huecos en algunas secciones representadas que la impresión offset, pero se aproxima más a los límites de MacAdam.

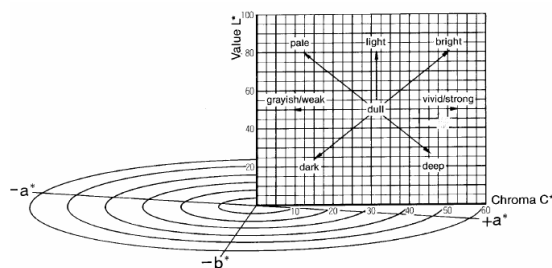


Figura 54. Tipos de matiz en una sección de ángulo-tono constante en el espacio de color CIELAB.

Examinando cada sección de tono y teniendo en cuenta el esquema de matices en perfiles de tono constante (Figura 54), podemos ver lo siguiente: existen más rojos profundos en impresión láser y chorro de tinta que en impresión offset y hay más colores azules fuertes en impresión láser, pero existen más azules brillantes en los otros tipos de impresión, chorro de tinta y offset.

En este estudio hemos aplicado la metodología descrita anteriormente para tres tipos de impresión: láser, chorro de tinta y offset. La impresión láser presenta mejores resultados en este tipo de papel como hemos visto en los planos de claridad y tono constante, aunque para establecer de manera definitiva la mejor calidad de la tecnología de impresión láser, debería hacerse este estudio de forma más extensa, comparando distintas impresoras láser y con diferentes tipos de sustratos.

Podemos afirmar que con ninguna de los tres tipos de impresión analizados se alcanzan los límites de MacAdam, por lo que creemos que es necesaria una mayor investigación en la industria química para obtener nuevos tintes y pigmentos para las diferentes tecnologías de impresión, así como en la industria papelera, para intentar alcanzar los límites perceptibles por el ojo humano. Además este tipo de estudio, basado en un exhaustivo análisis de los datos colorimétricos en el espacio CIELAB, podría ayudar para controlar la calidad de todas las tecnologías de impresión.

Por tanto, la metodología descrita puede ser aplicada para:

- Comparar gamas de colores pertenecientes a cualquier tecnología de reproducción del color, pudiéndose extender este estudio a impresión huecograbado, flexografía, impresión textil, etc.
- Calcular y representar perfiles ICC en distintos planos de claridad y tono constante.

- Comparar gamas de colores con diferentes tipos de papel u otros sustratos de la misma tecnología de impresión.
- Comparar diferentes cartas de caracterización CMYK y RGB y proponer mejoras para cubrir de forma más homogénea el sólido de color de Rösch-MacAdam.
- Buscar nuevos colorantes (pigmentos y tintes) en todas las tecnologías de impresión para alcanzar los límites de MacAdam.

4.3. Comparativa de gamas de colores de diferentes tipos de papel con la misma tecnología de impresión

Este trabajo se centra fundamentalmente en el análisis comparativo de la gama de colores de una única tecnología de impresión, pero utilizando distintos tipos de papel. Este estudio ha sido fruto de la colaboración con el Departamento de Óptica de la Universidad de Granada y con la empresa Hewlett Packard de Barcelona. Estas entidades nos han facilitado los datos colorimétricos de las muestras y las características de cada uno de los papeles analizados. Las muestras fueron impresas en la impresora HP DesignJet 120, calibrada convenientemente para cada tipo de papel (Glossy, Semi-glossy o Mate) y utilizando la carta de color IT8/7.3. Los distintos tipos de papel utilizados han sido:

- HP Premium Photo Paper Glossy
- HP Premium Plus Photo Paper Glossy
- HP Proofing Semi-Gloss
- HP Proofing Gloss
- HP Proofing Matte
- HP Proofing Matte

- HP Professional Brochure & Flyer Paper, 2-sided Matte Finish
- HP Professional Brochure & Flyer Paper, 2-sided Gloss
- HP Premium Paper Matt
- HP Bright White InkJet Paper
- Epson 360 dpi Ink Jet Paper (Special Coated)
- Epson Photo Quality Ink Jet Paper (Coated)
- Epson Photo Quality Glossy Paper
- Epson Archival Matte Paper
- Epson Matte Paper Heavyweight (Heavy Coated)
- Epson/Dupont Commercial Proofing
- Epson Premium Glossy Photo Paper
- BestColor-Proof Paper 5150 Glossy
- BestColor-Proof Paper 5120 Matt
- Best Remoteproof Paper 9180 Semimatt
- Dupont CromaPro XP Gloss
- Dupont CromaPro XP Semi Matt
- CGS Proof Heavy Gloss
- CGS Proof-Weiss Heavy SemiMatt NEU
- Agfa InkJet Photopaper 2 in 1 Glossy and Satin
- Kodak Ultima Picture Paper for InkJet Prints (Ultra Gloss)
- Imation Matchprint InkJet Commercial Base (White)
- Imation Matchprint InkJet Design Base (Super White)
- Ilford Classic Gloss Paper
- Agfa InkJet Photopaper 2 in 1 Glossy and Satin

La reflectancia espectral $\rho(\lambda)$ de las muestras de cada carta de color se midieron con un espectrofotómetro (Spectrolino), bajo el iluminante D50 y el observador de 2°. Los valores CIE- $L^*a^*b^*C_{ab}^*h_{ab}^*$ para cada muestra coloreada se representan en perfiles de claridad L^* y ángulo-tono h_{ab}^* constantes teniendo en cuenta los límites de MacAdam asociados al iluminante D50. Es

decir, los datos CIELAB asociados a todas las muestras impresas se ordenan en orden creciente de claridad L^* para agruparlos a continuación en planos de claridad constante con un margen de $\Delta L^* = \pm 5$. Y, por otro lado, los datos CIELAB obtenidos se ordenan también en orden creciente de ángulo-tono h_{ab}^* para agruparlos a continuación en planos de tono constante teniendo en cuenta el margen existente entre los tonos principales del atlas Munsell (5R, 5YR, 5Y, etc).

Análisis en planos de claridad constante

A continuación se muestran distintas figuras donde se realiza una primera comparación entre las distintas gamas de color obtenidas para cada tipo de sustrato (papel) y para varios valores de claridad L^* . Se compara la gama de color en grupos de tres, para así determinar para qué sustrato la gama de color reproducida es mejor, es decir, cuál de ellas se aproxima más a los límites del ojo humano y lo hace de forma más homogénea.

Se eligen perfiles distintos de L^* (20, 40, 60, 80), teniendo así colores muy oscuros, de claridad intermedia y claros. Se ha analizado la gama de color obtenida con todos los papeles citados anteriormente, pero sólo se van a mostrar como ejemplo las gráficas obtenidas con una selección de ellos.

En la Figura 55 se representa la gama de color obtenida con tres papeles diferentes. Pertenecen a la compañía Epson con gramajes 192, 167 y 255 g/m², cada uno de ellos con aplicaciones distintas: uso general y fotografía. Estos papeles tienen acabado diferente, dos de ellos con acabado mate (gráficas izquierda y centro) y el otro con brillo (derecha)

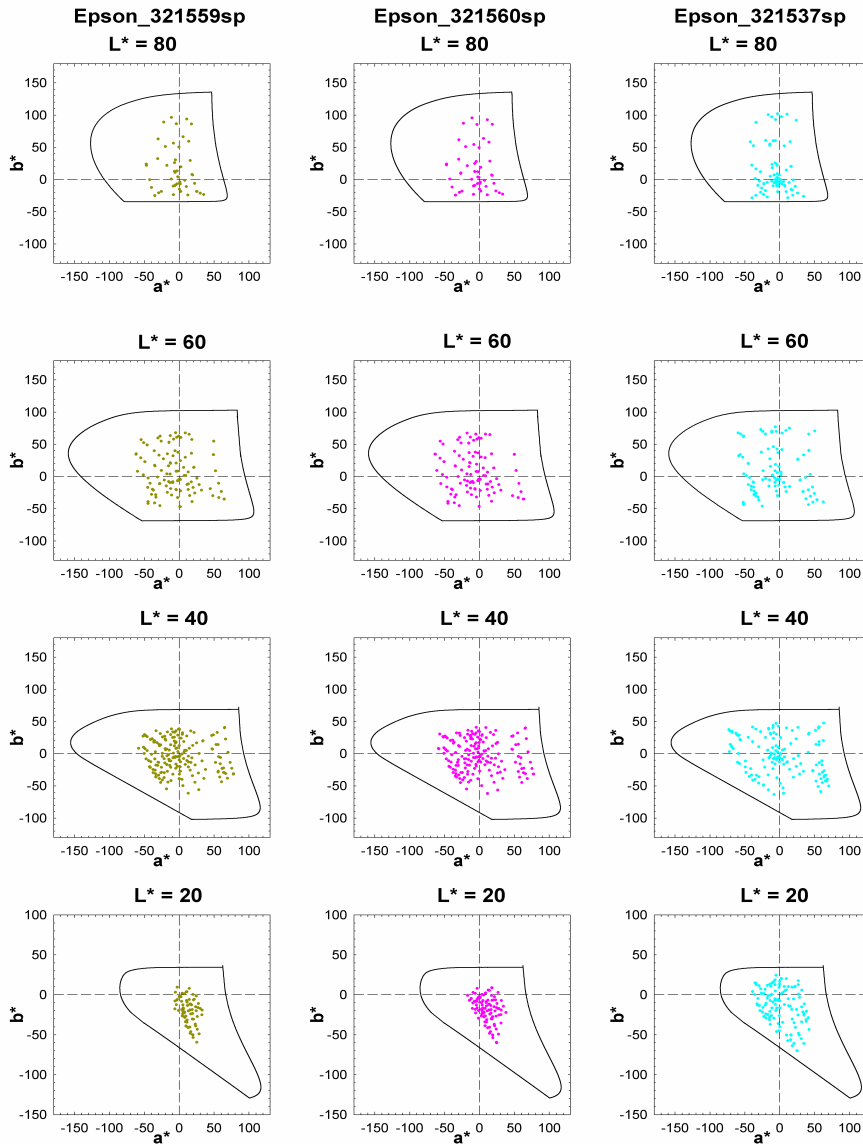


Figura 55. Comparativa entre la gama de color de tres papeles Epson: mate y uso general (izquierda), mate y fotográfico (centro) y brillo y fotográfico (derecha)

Tras esta representación comprobamos que existe una reducción de colores oscuros en papel mate y además existe una ampliación ligera de la gama de colores en papel brillante, ya que se acerca más a los límites del ojo pero aún así hay zonas que no son cubiertas. El tercer papel presenta acabado brillante y mayor gramaje respecto a los otros dos por lo que a partir de esta

comparativa no podemos afirmar que el aumento relevante de gama de color se deba al tipo de acabado o al gramaje.

En la siguiente figura se presenta la comparativa entre tres papeles pertenecientes a la compañía Best Color. Cada uno de ellos con un acabado diferente: brillo o glossy (izquierda), mate (centro) y semi-mate (derecha).

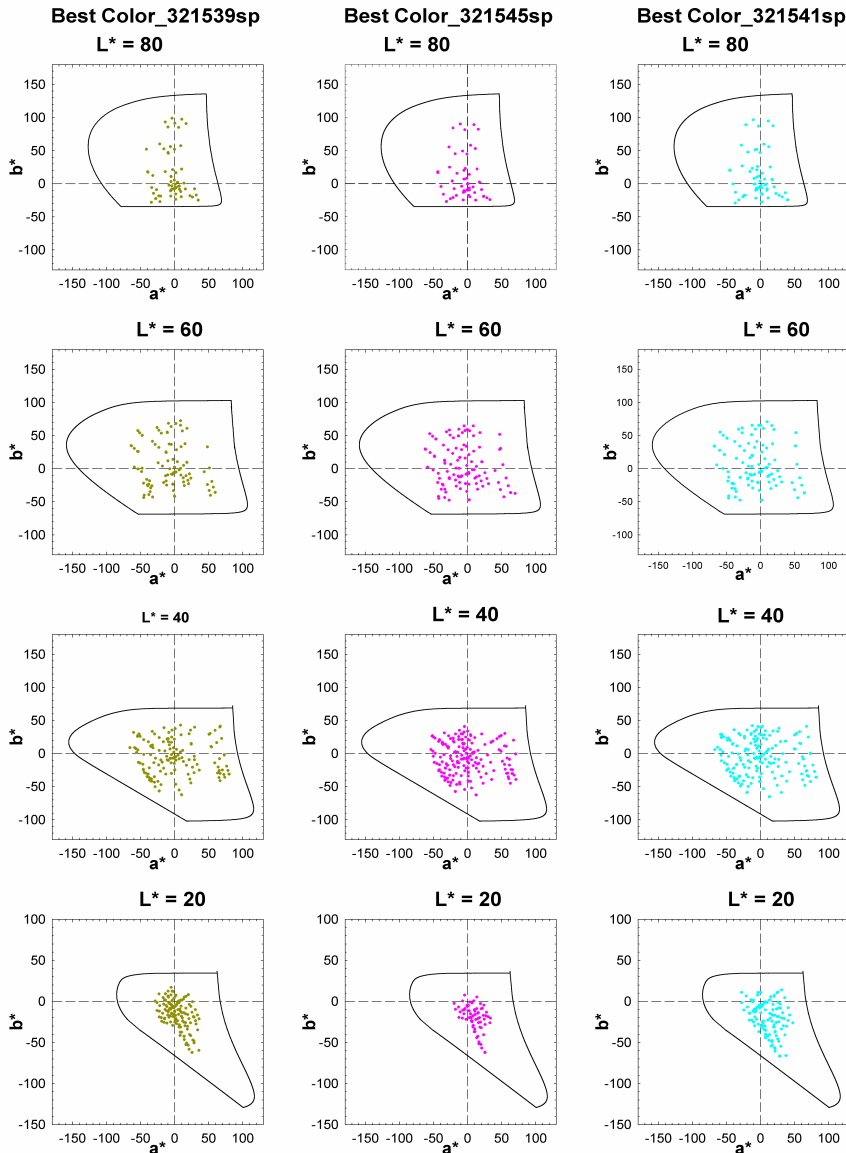


Figura 56. Comparativa entre papeles de Best Color con diferente acabado: glossy (izquierda), mate (centro) y semi-mate (derecha).

En este caso podemos decir que la gama de color menos extensa se obtiene con el papel mate. Las diferencias entre los dos otros tipos de papel (glossy y semi-mate) son menores, comprobamos que para todos los perfiles de claridad representados la gama de color asociada a cada papel es muy parecida. Como hemos comprobado se tienen resultados equiparables entre el glossy y el semimate por lo que podríamos plantearnos el uso del papel glossy ya que en el mercado existe una diferencia de precio entre estos dos tipos de papel, siendo más caro el glossy.

A continuación se presenta la comparativa entre: dos papeles de la compañía Dupont y otro de Epson. Cada uno de ellos tiene un acabado diferente, brillo y semi-mate. Los dos papeles pertenecientes a Dupont tienen el mismo gramaje, 260 g/m^2 , mientras que el Epson presenta un gramaje inferior, de 190 g/m^2 .

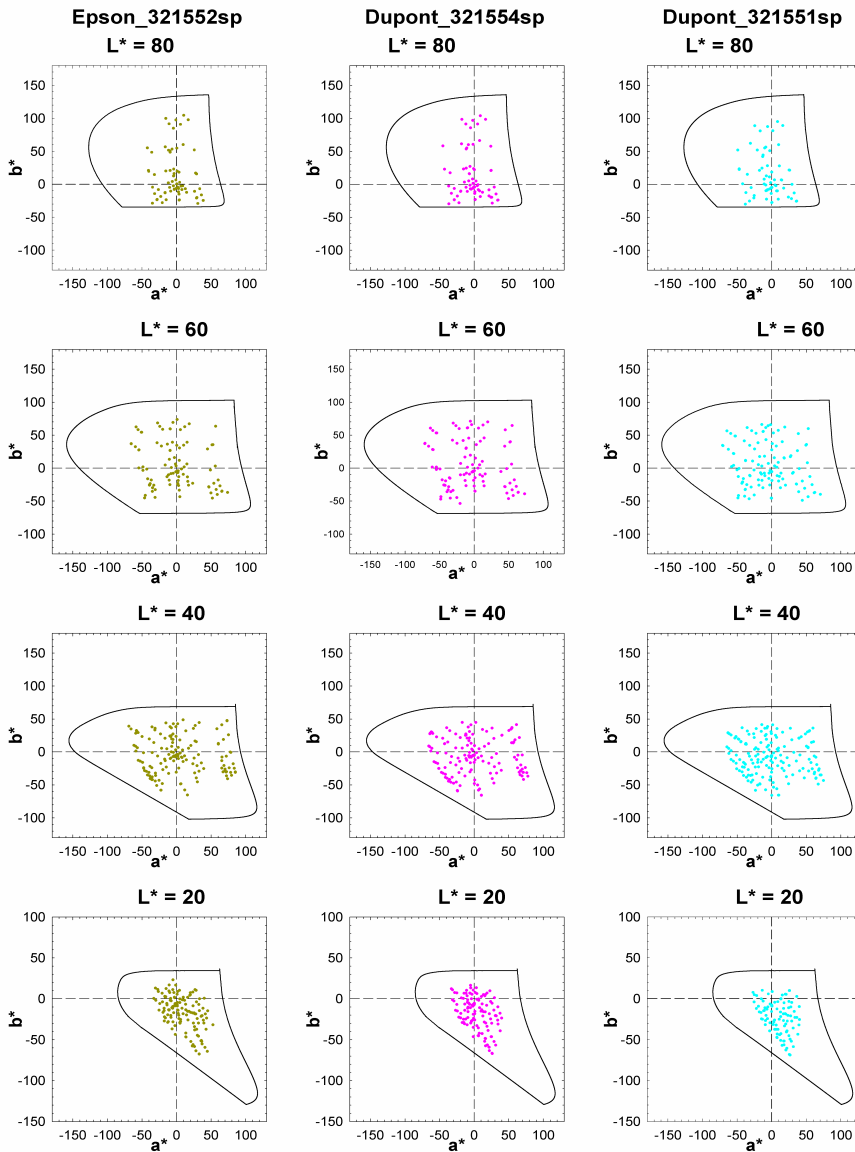


Figura 57. Comparativa entre papeles Dupont y Epson con diferente acabado: brillo (izquierda), brillo (centro) y semi-mate (derecha).

Observamos ahora que para colores claros y oscuros prácticamente no se observan diferencias. Para perfiles intermedios podemos comprobar que la gama de color es más extensa para el papel Epson, aunque quedan zonas sin cubrir que sí son cubiertas en el papel Dupont de acabado semi-mate. Debido a esto es difícil determinar únicamente con esta comparativa cuál de los tres

papeles utilizados reproduce una mayor gama de color. Pero si podemos decir que con el acabado semi-mate se consiguen altas prestaciones equiparables al papel brillante.

Análisis en planos de tono constante

Hemos comprobado a partir del análisis anterior que es difícil establecer que papel reúne mejores prestaciones. Realizamos por tanto otro tipo de análisis para realizar una mejor clasificación de los tipos de papel usados.

Representamos los colores reproducidos por la impresora en cada uno de los papeles en perfiles de tono constante. Para ello se eligen los diez planos principales del atlas Munsell ($\Delta h^* = 36$) y se presentan gráficas en el formato L_{ab}^* vs C_{ab}^* . Se van a presentar los mismos grupos que en el apartado anterior: un primer grupo de papeles Epson, el segundo grupo de Best Color y el último de Dupont y Epson. Analizaremos nuevamente las diferencias observadas en la gama de colores obtenida con cada uno de los papeles, con el fin de determinar, junto con la comparación anterior, que papel presenta mejores prestaciones en cuanto a la reproducción del color.

En la Figura 58 se comparan el primer grupo de papeles, todos ellos de la compañía Epson:

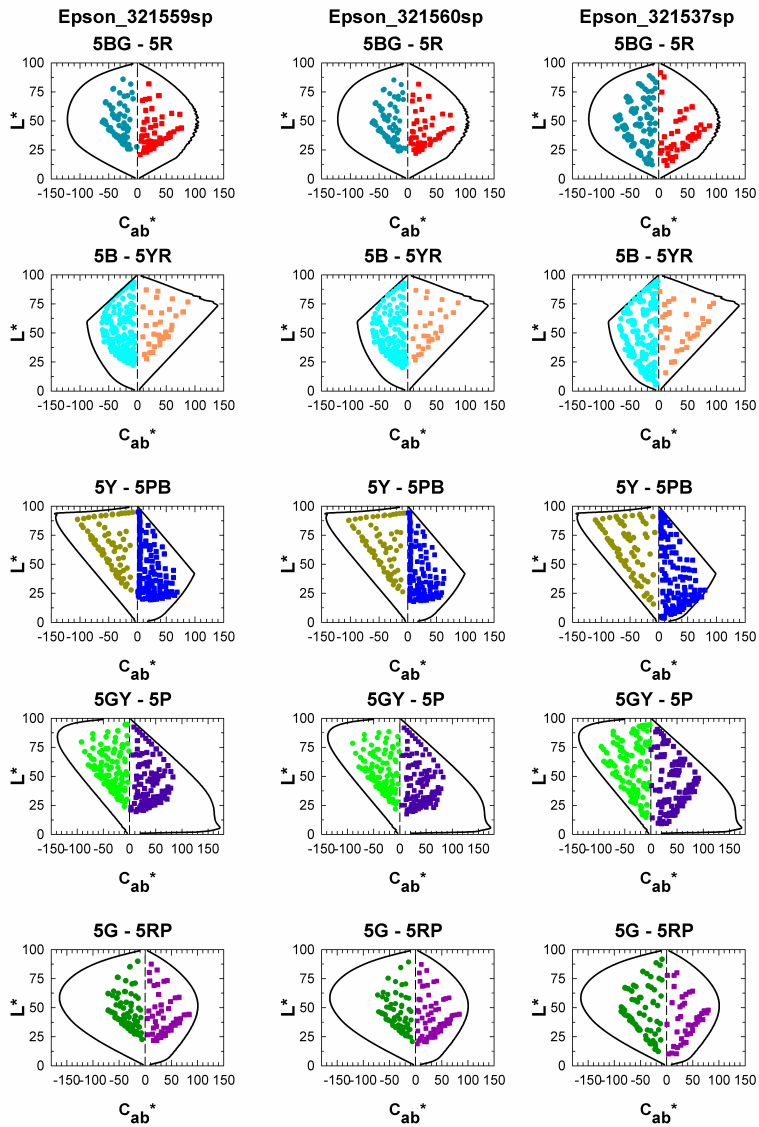


Figura 58. Comparativa entre la gama de color de tres papeles Epson: mate y uso general (izquierda), mate y fotográfico (centro) y brillo y fotográfico (derecha).

Se observa que la mejor gama de color es la asociada al papel con brillo, se ve que cubre de forma más extensa la región delimitada por los límites del ojo humano. De tal forma se tienen, por ejemplo, más rojos oscuros y más verdes-amarillentos claros que en los otros dos papeles.

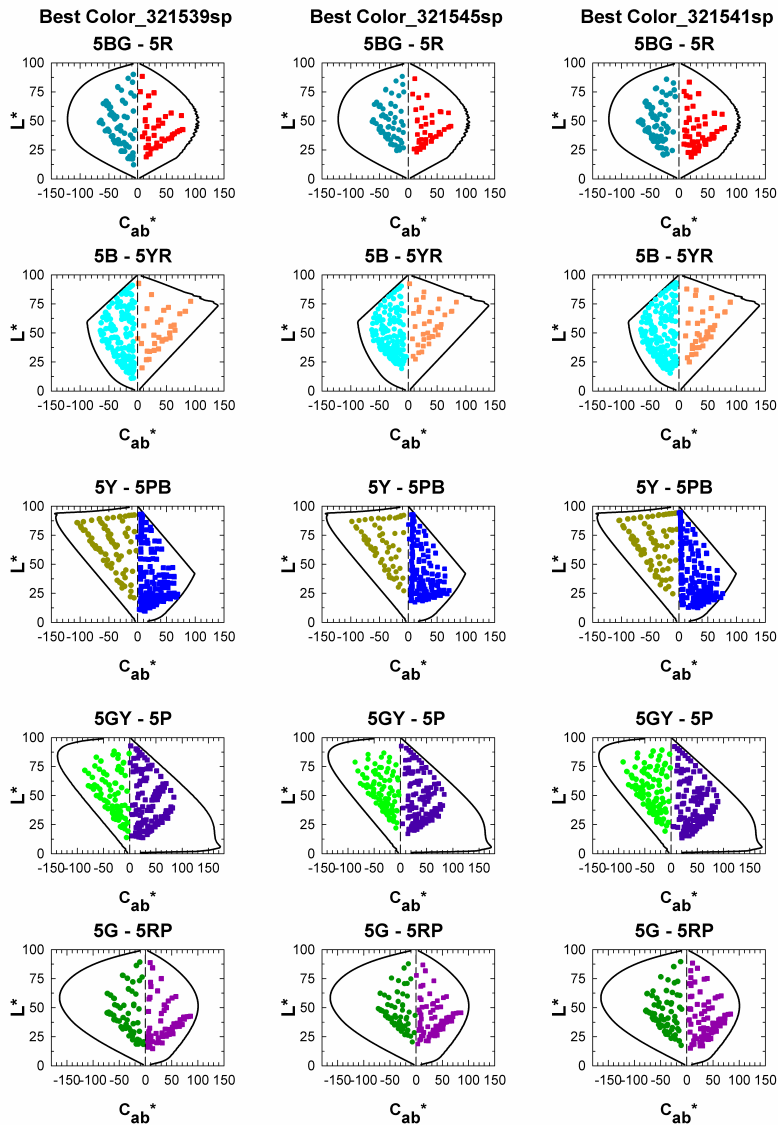


Figura 59. Comparativa entre papeles de Best Color con diferente acabado: glossy (izquierda), mate (centro) y semi-mate (derecha).

En la comparativa entre papeles pertenecientes a la compañía Best Color (Figura 59) podríamos decir que la gama de color más reducida corresponde al papel de acabado mate y la diferencia entre los otros dos papeles, acabado semi-mate y con brillo radica en el

hecho que el papel con brillo reproduce mejor el negro, se obtienen colores más oscuros que en los otros dos papeles.

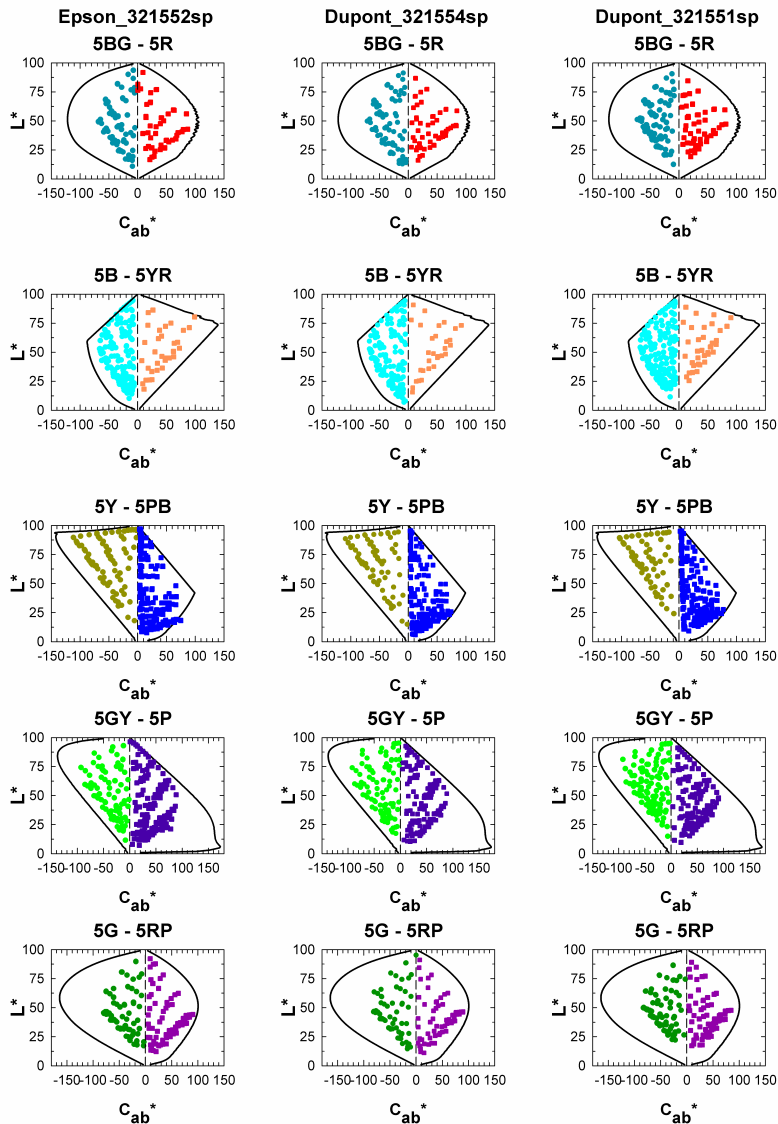


Figura 60. Comparativa entre papeles Dupont y Epson con diferente acabado: brillo (izquierda), brillo (centro) y semi-mate (derecha).

Para el último grupo, como ocurría en perfiles de claridad constante no observamos grandes diferencias entre ellos, la gama

de colores de cada uno de ellos es muy parecida, por lo que en esta compañía no se ofrecen mayores prestaciones en cuanto a la reproducción del color al considerar acabado con brillo y semi-mate.

Tras analizar las gráficas obtenidas para cada tipo de papel y ser comparadas entre ellas podemos concluir que no existen grandes diferencias entre las distintas compañías estudiadas. Comparando papeles de igual acabado, pero de distinto fabricante tenemos gamas de colores muy similares, a pesar de no haber podido comparar exactamente papeles de igual acabado y gramaje, sólo con un gramaje aproximado. Algunas de ellas se diferencian en la mejor reproducción del negro, pero no respecto a la forma en que se cubre la región delimitada por los límites del ojo ya que en todos ellos se cubre de forma bastante homogénea.

Si nos centramos en la comparación de la gama de colores obtenida con papeles pertenecientes a la misma compañía, observamos que el rendimiento colorimétrico es ligeramente superior para los papeles de acabado brillante, pero cabe destacar que no se obtienen grandes diferencias entre éstos y los de acabado semi-brillo (o semi-mate) y sin embargo en el mercado si existen diferencias en cuanto al precio.

Considerando papeles de la misma compañía, con igual acabado pero distinto gramaje, observamos que existen diferencias. La forma en que se cubre el sólido de color es en todos ellos muy aproximada, pero vemos que la gran diferencia radica en el hecho de la mejor reproducción del negro, observando que a menor gramaje peor reproducción del negro.

Creemos que la cuestión pendiente es determinar cuál de los parámetros (gramaje o acabado) implica una mayor variación en la gama de colores. Para cuantificar esto sería necesario pasar de un análisis cualitativo de este trabajo a otro donde pudiéramos correlacionar el área de gama de color con una variable numérica

asociada al acabado o al gramaje. Un método para ello sería cuantificar esas áreas de gama de color por claridad constante calculando el número de colores distinguibles.

5. Viabilidad

Para el desarrollo de este proyecto es necesario disponer de suficientes medios económicos que permitan realizar todas las tareas programadas. Los primeros resultados presentados aquí han sido desarrollados de acuerdo con el proyecto de investigación, *"Investigación y desarrollo de elementos de control para la reproducción del color en artes gráficas"* (ref. IIARCO/2004/59), subvencionado por la Consellería de Empresa, Universidad y Ciencia. El resto de tareas estarán desarrolladas en el marco de un nuevo proyecto: *"Desarrollo e implementación industrial de nuevos sistemas de medida y gestión de color. Ampliación de las gamas de colores industriales"* (ref. DPI2005-08999-C02-02) subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Además de un apoyo económico, obviamente es necesario disponer de los datos adecuados para realizar cada una de las tareas o aplicaciones expuestas en la definición del proyecto, así como la instrumentación necesaria para obtener las medidas necesarias en cada caso.

5.1. Obtención de datos: visión animal y deficiente e industrias de coloración

Anteriormente se ha establecido el listado de datos de entrada necesarios para realizar el cálculo de colores óptimos según nuestro algoritmo. Como hemos visto es necesario conocer las sensibilidades espectrales del observador o dispositivo de captura que se quiere estudiar, por lo que para desarrollar este trabajo será necesario conocer estos datos.

Hasta ahora hemos calculado colores óptimos para un observador normal. Si queremos extender nuestro estudio a observadores con deficiencias visuales (tricrómatas anómalos o

dicrómatas), deberemos conocer las sensibilidades espectrales asociadas a estos observadores con el fin de calcular los colores óptimos y poder comparar el sólido de color obtenido para estos observadores con el un observador normal bajo diferentes iluminantes. Estos datos se encuentran en la bibliografía actual (www.cvrl.org; Wyszecki, Stiles, 1982, 469), por lo que no supone ningún problema el cálculo de colores óptimos para estos observadores porque se puede acceder a ellos.

De la misma forma, si este algoritmo se quiere aplicar a diferentes dispositivos de captura para conocer la gama de color reproducida por ellos, también es necesario conocer sus sensibilidades espectrales. Para ello se realiza un proceso de calibración o caracterización colorimétrica del dispositivo como el descrito en el apartado 1.3.4. Este procedimiento puede ser aplicado a cualquier dispositivo de captura, por tanto se podría disponer de los datos necesarios (las pseudo-funciones de igualación RGB) y a partir de éstas aplicar el algoritmo descrito anteriormente con el fin de calcular los colores óptimos y poder representar el sólido de color asociado al dispositivo de captura estudiado y analizar su capacidad de reproducción de color comparándolo con otros dispositivos de captura.

Como hemos comentado en secciones anteriores, este trabajo también se puede extender a visión animal, para así poder conocer la gama de colores asociada a diferentes especies animales. El problema para analizar la gama de colores perceptibles por estos observadores según el método propuesto en este trabajo, es conocer o disponer de datos sobre las sensibilidades espectrales de los fotorreceptores presentes en el sistema visual de las especies animales a estudiar. Actualmente se están desarrollando diferentes métodos que permiten calcular las sensibilidades espectrales de los fotorreceptores, entre todos destacan la microespectrofotometría (MSP) y la genética molecular. Una vez conocidas las sensibilidades

espectrales podríamos calcular el sólido de color en su propio espacio RGB o LMS.

Una de las aplicaciones expuestas en este trabajo es el estudio de gamas de colores asociadas a diferentes tecnologías de reproducción. En este trabajo se ha incluido el estudio de tres tecnologías de impresión, pero puede aplicarse a otras tecnologías de reproducción de color o a otros sectores industriales, como pueden ser el textil, pinturas, plásticos, etc. Para realizar este análisis es necesario la colaboración de estas industrias de coloración, plasmada en la cesión de las muestras de su gama de color con el fin de caracterizarlas mediante un espectrofotómetro y representar las muestras en planos de claridad y tono constante según el método propuesto anteriormente para ser comparadas con los límites de MacAdam. O, directamente, utilizar su base de datos, lo cual no es tan sencillo ya que generalmente en estas bases de datos se incluyen datos sobre la formulación química de los colores, por lo que las industrias no permiten el acceso a estas bases de datos al tratarse de propiedad industrial.

5.2. Instrumentación necesaria

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado un espectrofotómetro (Minolta CM-2600d) con el cual se han hecho las medidas de las muestras de las cartas de caracterización impresas con las tres tecnologías estudiadas. Para la ampliación de este estudio en otros sectores industriales se procederá de la misma manera. Dado un conjunto de muestras se obtendrá su espectro de reflectancia y datos colorimétricos con este espectrofotómetro.

Siguiendo esta línea si se quiere ampliar también el estudio a otras gamas de colores, por ejemplo para colores fluorescentes, metalizados y perlados, será necesario un instrumento de medida específico que permita evaluar estas muestras y que nos dé

información sobre los espectros de reflectancia o transmisión o que nos aporte datos colorimétricos.

Para colores metálicos y perlados se ha adquirido recientemente el gonio-espectrofotómetro MultiFX10, diseñado para la medida de materiales gonio-aparentes. Estos materiales cambian su apariencia en función de la iluminación y del ángulo de visión.

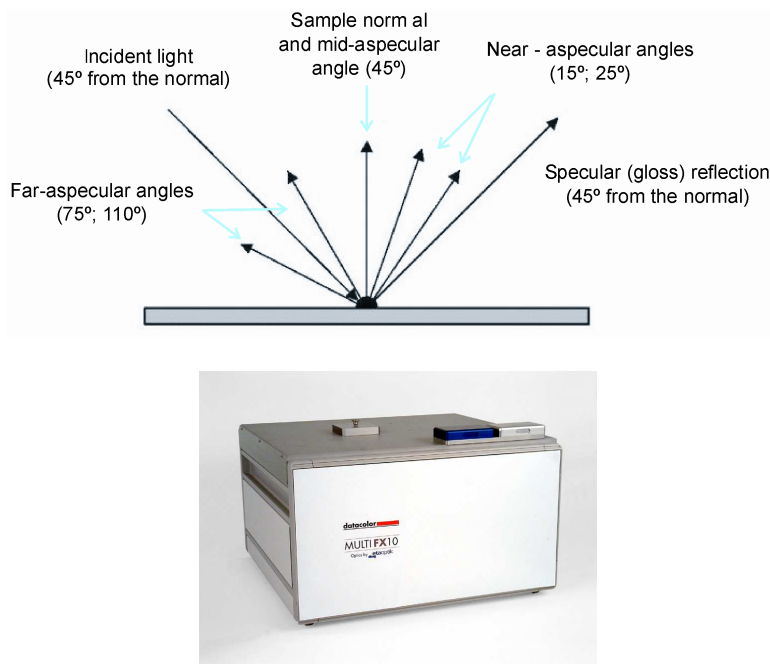


Figura 61. Geometría de medida de un espectrofotómetro multiángulo (arriba). Espectrofotómetro MultiFX10 (bajo)

Tradicionalmente, un espectrofotómetro bidireccional ($45^{\circ}/0^{\circ}$ o $0^{\circ}/45^{\circ}$) tiene únicamente un ángulo de iluminación y un único ángulo de visión. Por lo que estos instrumentos no pueden ser usados para caracterizar o evaluar materiales gonio-aparentes. Sin embargo, el gonio-espectrofotómetro MultiFX10 tiene diez configuraciones diferentes que permiten modificar tanto el ángulo de iluminación como el de visión.

Para colores fluorescentes se pretende adquirir un espectrofluorímetro. Este dispositivo está constituido por una fuente

luminosa (normalmente una lámpara de Xenon), un monocromador para seleccionar la longitud de onda de respuesta, un monocromador para seleccionar la longitud de onda de emisión y un detector. La geometría de medida recomendada por la CIE para colores fluorescentes es $0^\circ/45^\circ$. En un análisis típico, el monocromador de excitación realiza un proceso de escaneado para determinar la longitud de onda que produce el máximo de fluorescencia. El espectro de salida se parece al espectro de absorción excepto que las variaciones de intensidad de la lámpara, ópticas y del detector afectan al espectro. Fijando la longitud de onda de excitación en el máximo del espectro de excitación, el monocromador de emisión realiza un proceso de escaneado para obtener el espectro de emisión que muestra la longitud de onda donde la emisión es máxima.

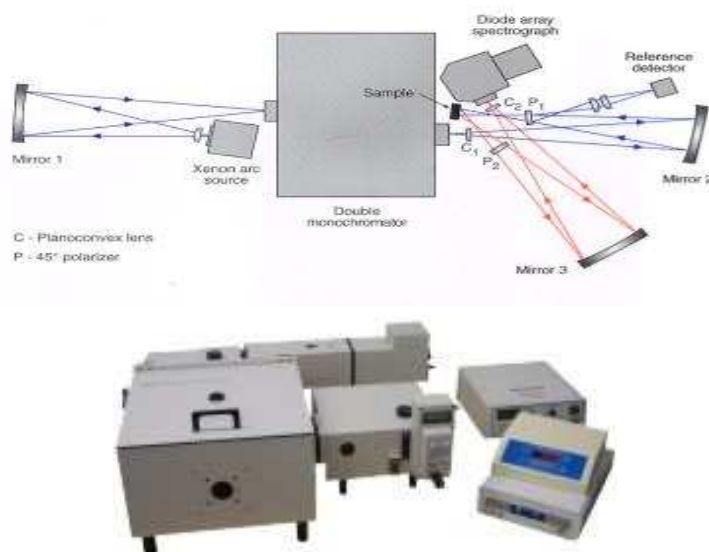


Figura 62. Esquema del funcionamiento de un espectrofluorímetro (arriba). Espectrofluorímetro PTI de Estado Estacionario y Fosforescencia Modulares (bajo).

6. Interés industrial, transferencia de resultados y personas

El cálculo de los colores óptimos para determinar la forma o el volumen del sólido de color para diferentes observadores/fuentes de luz nos ofrece muy diversos campos de actuación. A lo largo de este proyecto hemos mostrado las distintas aplicaciones desarrolladas a partir de esta idea central, poniendo de manifiesto su gran interés científico, entre ellas: obtención del sólido de color para el cálculo del rendimiento colorimétrico de fuentes de luz, análisis de gamas de colores para conocer las capacidades de las tecnologías de reproducción del color y estudio sobre la visión del color de animales y dispositivos artificiales.

El cálculo del número de colores distinguibles del sólido de color asociado a diferentes iluminantes y lámparas reales nos permite establecer otro método para la obtención del rendimiento colorimétrico. Este método es fácil de implementar y permite realizar una clasificación de los iluminantes sin tener que elegir ninguno como referencia. Esta clasificación podía orientar al sector industrial de la iluminación para así determinar qué iluminante es más idóneo según las necesidades del cliente o dependiendo de las tareas a iluminar (museos, hospitales, industrias, vehículos, etc).

También es notable la aportación de este trabajo a las tecnologías del color. Hemos desarrollado un método simple para comparar gamas de colores de diferentes tecnologías de reproducción del color con los límites del ojo humano. Esto nos permite conocer las capacidades en cuanto a reproducción del color de la industria actual e informar así al empresario sobre la posibilidad de aumentar dicha gama de color (si fuera posible) utilizando nuevos tintes o pigmentos, o utilizando un tipo de sustrato u otro.

Este proyecto además permite la transferencia de resultados entre distintas universidades. La Universidad de Granada colabora con aportaciones sobre gamas de colores en diferentes tipos de papel y en un futuro se esperan nuevas colaboraciones. La Universidad de Valencia nos aporta sus conocimientos en percepción del color, por lo que las posibles conexiones científicas entre nosotros ayudarán a mejorar este trabajo. Además también se pretende colaborar con la Universidad de California, Santa Bárbara, a través del profesor Mickey Rowe (<http://www.lifesci.ucsb.edu/~mrowe/>). El campo de investigación de este científico se centra fundamentalmente en el estudio de la relación entre el sistema visual humano y su hábitat. Algunos de los proyectos en los que está trabajando se centran en una técnica a la que denomina "functional substitution" (Rowe, Baube, Phillips, 2004). La idea básica de esta técnica es intentar conocer las capacidades visuales de diferentes especies animales y establecer las diferencias entre su biología sensorial y la del ser humano. Su objetivo es reproducir en las neuronas sensoriales humanas, la actividad de las neuronas de la especie animal a estudiar. Este desarrollo ha sido aplicado para analizar la evolución de la visión del color en la especie de mono "New World" (Rowe, Jacobs, 2004). Por tanto, sus notables conocimientos sobre visión animal nos permitirán el estudio detallado de la visión del color de distintas especies animales planteado en este trabajo.

En cuanto a colorimetría industrial, hemos colaborado activamente en varios proyectos con la Asociación Industrial de Óptica, Color e Imagen (AIDO) de la Comunidad Valenciana, uno de ellos, por ejemplo, basado en el análisis de impresión con tecnología de huecograbado. Se pretende seguir colaborando con esta asociación en futuros estudios. En el campo empresarial, hemos también establecido contactos con la distribuidora nacional del fabricante internacional de instrumentos de color Datacolor, ya

que como hemos dicho se pretende realizar un estudio de la gama de colores especiales (metálicos, perlados y fluorescentes).

Algunos de los resultados presentados en este proyecto de tesis ya han sido presentados en diferentes congresos de ámbito internacional y nacional. Se presentaron varias contribuciones al Congreso de la Asociación Internacional del Color (AIC) celebrado en el 2005 (<http://www.aic-color.org/>). Se participó en el congreso celebrado por la Asociación Internacional de los Institutos de Investigación para la Industria de Artes Gráficas (IARIGAI) en el año 2005 (<http://www.iarigai.com/>). Se ha participado también este año en European Conference on Colour in Graphics, Image and Vision (CGIV) (<http://www.imaging.org/conferences/cgiv2006/>) con dos trabajos. Se han presentado varios trabajos a la Reunión Nacional de Óptica a celebrar en el próximo mes de septiembre (<http://www.rno8.com/index.php>). Además se pretende participar en ediciones futuras de estos congresos como en otros dentro de esta misma área, como pueden ser: Color Imaging Conference (CIC) (<http://www.imaging.org/conferences/cic13/index.cfm>); Electronic Imaging (<http://electronicimaging.org/>);

Además de las contribuciones a diferentes congresos como difusión de resultados, pretendemos realizar publicaciones en revistas de diferente temática:

- Journal of the Optical Society of America (2.04)
(<http://josaa.osa.org/Issue.cfm>).
- Vision Research (1.812)
(http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/263/description?navopenmenu=1).
- Dyes and Pigments (1.610)
(http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/405894/description?navopenmenu=-2).
- Coloration Technology (0.790)
(<http://www.sdc.org.uk/publications/coltechnol.htm>).

- Color Research & Application (0.739)
(<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jhome/35037>).
- Journal of Imaging Science and Technology (0.609)
(<http://www.imaging.org/pubs/jist/index.cfm>).
- The Imaging Science Journal (0.463)
(<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/isj>)
- Journal of Vision (<http://www.journalofvision.org/>).
- Iluminación (<http://www.iluminacionprofesional.net/>).
- Technical Association of the Graphic Arts
(<http://www.taga.org/>).

7. Plan de trabajo con estimación de calendario

En el apartado de definición de proyecto hemos expuesto las diferentes tareas que se pretenden desarrollar. Por lo que, a continuación se estimará el periodo probable que se pretende dedicar a cada una de ellas, estableciendo en paralelo un orden de prioridades.

7.1. Optimización de los resultados preliminares

En este proyecto se han presentado los resultados obtenidos para algunas de las aplicaciones propuestas.

En primer lugar se ha reflejado el hecho de que el sólido de color varía en función del iluminante y del espacio de color en el que se trabaja. Más adelante obtendremos dicho sólido para otros iluminantes y fuentes reales de luz con el fin de poder realizar una comparación atendiendo al volumen del sólido.

En segundo lugar se ha realizado un análisis de la gama de color en impresión. Primero se ha realizado una comparación entre diferentes tecnologías de impresión con el fin de determinar cuál de ellas ofrece mejores resultados. Se optimizarán dichos resultados extendiendo el estudio para otros modelos dentro de las mismas tecnologías, ya que el análisis únicamente de tres impresoras no permite determinar qué tecnología de impresión es la mejor. Además de extenderse el estudio a otras tecnologías de impresión: huecograbado, serigrafía, flexografía, impresión textil... También se ha pretendido analizar cómo influye el sustrato en la reproducción del color; en este caso nos hemos centrado en los diferentes tipos de papel utilizados en impresión. Se pretende ampliar dicho estudio, ya que como hemos comprobado son varios los factores que

influyen (gramaje, acabado) y en los resultados presentados no se ha tenido en cuenta de manera controlada para determinar las ventajas o inconvenientes de usar un tipo de papel u otro.

7.2. Cronograma de las fases/etapas

En la Tabla 4 quedan reflejadas las diferentes tareas que se pretenden llevar a cabo en este proyecto. Siguiendo la línea establecida en la definición del proyecto hemos estructurado el trabajo en cuatro años, ya que la fecha probable de lectura de tesis será aproximadamente para el final del curso académico 2007-2008.

El objetivo del primer año fue la determinación del sólido de color bajo varios iluminantes o fuentes reales de luz, para lo que se desarrolló un nuevo algoritmo. Otro de los objetivos del primer año consistía en analizar la gama de colores de diferentes tecnologías de impresión y establecer una clasificación. A partir de aquí se han elaborado nuevos objetivos, algunos de ellos llevados a cabo durante el segundo año. Se está planteando una alternativa al cálculo del rendimiento colorimétrico a partir del volumen del sólido de color determinado previamente. Además se ha extendido la comparación de gamas de colores a otras tecnologías de reproducción del color, como cámaras y algún tipo de pantallas. Los objetivos del tercer año consisten en analizar otras tecnologías de reproducción del color, en este caso en impresión, textil y en pinturas, además de analizar la gama de colores obtenida con colores especiales. Se pretende también determinar el sólido de color para observadores anómalos y realizar el cálculo de colores distinguibles dentro de dicho sólido. Para el último año se extiende el estudio de gamas de colores a la industria del plástico, así como la determinación del sólido de color asociado a diferentes especies animales.

Tabla 4. Cronograma de las fases/etapas

ETAPAS	OBJETIVOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
Sólido de color según el iluminante	Determinación sólido				
	Cálculo de colores distinguibles				
Comparación gamas de colores de diferentes tecnologías de reproducción	Impresión				
	Cámaras				
	Pantallas				
	Colores especiales				
	Textil				
	Pinturas				
	Plásticos				
Visión del color anómala	Colores óptimos → sólido de color				
	Cálculo de colores distinguibles				
Visión animal	Colores óptimos → sólido de color				
	Cálculo de colores distinguibles				

8. Referencias

Adams J. M., Dolin P. A., *Printing Technology* (Delmar, United States of America, 2002).

Artigas J.M., Capilla P., Pujol J., *Tecnología del color* (Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia 2002), pp. 165-175.

Bamfield P. *Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry* (Royal Society of chemistry, Cambridge 2001).

Berns R., Katoh N., "Methods for characterizing displays", a P. Green y L.W. MacDonald (ed.), *Colour Engineering*, 143-164, Chichester: John Wiley & Sons (2002).

Berns R.S., Billmeyer, Saltzman's *Principles of Color Technology*, 3rd ed. (John Wiley & Sons, New York, 2000), pp. 62, 143.

Brown W. R. J., MacAdam D. L., "Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences", *J. Opt. Soc. Am.*, **39**, 808-834 (1949).

Capilla P., Luque M. J., Díez-Ajenjo M.A., "Looking for the dichromatic versión of a colour vision model", *J. Opt. A. Pura Appl. Opt.* **6**, 906-919 (2004).

Capilla P., Artigas J.M., Pujol J., *Fundamentos de colorimetría*, (Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia 2002).

Chalupa L. M., Werner J. S., *The Visual Neurosciences* (Massachusetts Institute of Technology, 2004).

Charvat R. A., *Coloring of Plastics: Fundamentals* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2004).

Christie R.M., *La química del color*, (Acribia, S.A., España 2003).

Chuvieco J., *Procesos de impresión offset*, (Aral, Madrid 2003).

CIE 13.3:1995, *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, (Commision Internationale de L'Eclaraige, Vienna, 1995).

CIE 15:2004, *Colorimetry*, 3rd ed., (Commision Internationale de L'Eclaraige, Vienna, 2004).

CIE 159:2004, *A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02* (Commision Internationale de L'Eclaraige, Vienna, 2004).

CIE 167:2005, *Recommended Practice For Tabulating Spectral Data For Use In Colour Computations* (Commision Internationale de L'Eclaraige, Vienna, 2005).

Cohen J. B., "Color and Color Mixture: Scalar and Vector Fundamentals", *Color Research and Application*, **13**, 5-39 (1988).

Commision Internationale de L'Eclaraige (CIE), "Criteria for the evaluation of extended-gamut colour encodings", draft no. 9, *CIE TC8-05: Communication of Colour* (Vienna, Commision Internationale de L'Eclaraige, 2003).

Crouch J. P. *Flexography primer*, (GAFT Press, 2nd ed., United States of America, 2003).

Cui G.; Luo M. R.; Rigg B.; Roesler G.; Witt K., "Uniform colour spaces based on the DIN99 colour-difference formula", *Color Res. Appl.*, **27**, 282-290, (2002).

Dawson T. L., *Textile inkjet printing* (Society of Dyers and Colourists, Bradford, 2004).

Deevi S., "Metallic pigments: overview and opportunities for digital printing", *Proc. NIP (International Conference on Digital Printing)*, **15**, 98-101 (1999).

Emmel P., *Digital Color Imaging Handbook*, (Gaurav Sharma Editor, CRCPress, Boca Raton, 2003), pp. 173-238.

Fairchild M. D., Johnson G. M., "The iCAM framework for image appearance, image differences, and image quality," *Journal of Electronic Imaging*, **13** 126-138 (2004).

Fairman H. S., "Recommended Terminology for Matrix R and Metamerism", *Color Research and Application*, **16**, 337-341.

Field G.G., *Color and Its Reproduction, Fundamentals for the Digital Imaging and Printing Industry*, (GATFPRESS, United States of America, 2004).

Flick E. W., *Paint & Ink formulations database* (William Andrew, New York 2005).

Foster D. H., *Inherited and Acquired Colour Vision Deficiencies: Fundamental Aspects and Clinical Studies* (Macmillan Press, UK 1991).

Freeman H. S., Peters A. T. *Colorants for non-textile applications* (Elsevier, Amsterdam 2000).

Gilabert E.J., *Química textil. Tomo II: Materias Colorantes*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2003).

Gilabert E.J., *Medida del Color*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2002).

Gouras P., *The Perception of Colour*, (MacMillan Press, New York 1991).

Green P. and MacDonald L.W., *Colour Engineering: Achieving Device Independent Colour* (John Wiley & Sons, Chichester, 2002).

Holst G. C. "CCD Arrays, cameras and displays", SPIE: The International Society for Optical Engineering (1996).

Holst G. C., *Electro-Optical Imaging System Performance*, 4th ed. (SPIE Press, Bellingham, 2005).

Horn B. K. P., "Exact Reproduction of Colored Images", *Comput. Vis. Graph. Image Process.* **26**, 135-167 (1984).

Hubel D.H., *Ojo, Cerebro y Visión* (Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia, Murcia 2000).

Hunt R. W. G., *The Reproduction of Colour*, 6th ed. (John Wiley & Sons, Chichester, 2004).

Jacobs G.H. and Rowe M.P., "Evolution of vertebrate colour vision", *Clin. Exp. Optom.* **87:4-5**, 206-216 (2004).

Janesick J., *Scientific Charge-Coupled Devices*, 1st ed. (SPIE Press, Bellingham, 2001).

Kelber A., Vorobyev M., Osorio D., "Animal colour vision - behavioural tests and physiological concepts", *Biol. Rev.*, **78**, pp. 81-118 (2003).

Kipphan H. *Handbook of print media: technologies and production methods*, (Springer, Berlin, 2001).

Krauskopf, J., Gegenfurtner, K. R. "Color discrimination and adaptation". *Vision Research*, **32**, 2165-2175 (1992).

Kuehni R. G., *Color Space and Its Divisions: Color Order from Antiquity to the Present* (John Wiley & Sons, New York 2003), pp. 91, 359.

Lasarte M. de, Pujol J., Arjona M., and Vilaseca M., "Optimized Algorithm for The Spatial Non-Uniformity Correction of an Imaging System Based on a CCD Color Camera", enviado a *Applied Optics* (October 2005).

Luo M.R., Rigg B., "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours", *Col. Res. Appl.*, **11**, 25-42 (1986).

Luther R., "Aus dem Gebiel der Farbreizmetrik" *Z. Tech. Phys.*, **8**, 540-558 (1927).

MacAdam D. L., "The theory of the maximum visual efficiency of colour materials", *J. Opt. Soc. Am.*, **25**, 249-252 (1935).

MacAdam D. L., "Maximum visual efficiency of coloured materials", *J. Opt. Soc. Am.*, **25**, 316-367 (1935).

McDonald LW. "Display requirements for desktop electronic imaging". En: MacDonald LW, Lowe AC, editores. *Displays Systems -Design and Applications*, (John Wiley & Sons, Chichester, 1997).

McDonald L.W., Luo M.R., *Colour Image Science: Exploiting Digital Media*. (John Wiley & Sons, Chichester, 2002).

Malo J., Luque M.J., "Reproducción del color en monitores" en *Tecnología del color* (Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia 2002).

Martínez-Verdú F., Pujol J., Capilla P., "Calculation of the Color Matching Functions of Digital Cameras from their Complete Spectral Sensitivities", *J. Imaging Sci. Technol.*, 46, 15-25 (2002).

Martínez-Verdú F., "Reproducción del color en impresoras" en *Tecnología del color* (Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia 2002).

Martínez-Verdú F., Pujol J. and Capilla P., "Characterization of a Digital Camera as an Absolute Tristimulus Colorimeter", *J. Imaging Sci. Technol.*, **47**, 279-295 (2003).

Martínez-Verdú F., Luque M.J., Capilla P., y Pujol J., "Concerning the Calculation of the Color Gamut of a Digital Camera", *Color Res. Appl.*, **31** (accepted, in press, 2006).

Mausfeld R., Heyer D., *Colour Perception, Mind and the Physical World* (Oxford, New York 2003).

McCamy C.S., "Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part II. Micro appearance" *Color Res. Appl.*, **23**, 362-373 (1998).

Mittal K.L., *Metallized Plastics: Fundamentals and Applications*, (Marcel Dekker, 1998)

Mollon J. D., Pokornoy J., Knoblauch K., *Normal and Defective Colour Vision* (Oxford Univ Pr, New York 2003).

Morovič J., Morovič P., "Determining Color Gamuts of Digital Cameras and Scanners", *Color Res. Appl.*, **28**, 59 (2003).

Morovič J., Morovič P., "Can highly chromatic stimuli have a low color inconstancy index?" *Proceedings of 13th IS&T/SID's Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications* (Society for Imaging Science and Technology, Springfield, 2005), pp. 321-325.

Morrison S., "Changing colours: the evolution of effect pigments", en www.specialchem4coatings.com (2003)

Nickerson D. "A Psychological Color Solid", *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 419-421 (1943).

Ohta N., Robertson A., *Colorimetry: Fundamentals and Applications* (John Wiley & Sons, New York, 2005).

Pointer M.R., "The gamut of real surface colours", *Color Res. Appl.* **5**, 145-155 (1980).

Pointer M.R., "On the number of discernable colours", *Col. Res. Appl.*, **23**, 337 (1998).

Pointer M.R., "Request for real surface colours", *Col. Res. Appl.* **27**, 374 (2002).

Rowe, M.P., and Jacobs, G.H. "Cone Pigment Polymorphism in New World Monkeys: Are All Pigments Created Equal?", *Visual Neuroscience*, **21**:217-222 (2004).

Rowe, M.P., Baube, C.L., Phillips, J.B. "Trying to See Red through Stickleback Photoreceptors: Functional Substitution of Receptor Sensitivities", *Ethology*, **112**(3), 218-229 (2006).

Rusthon, W.A.H., "Visual Pigments en man", in Handbook of Sensory Physiology, VII/I (H.J.A. Dartnall, ed. Berlin 1972), 364-394.

Ryntz R.A., Yanoff P.V. *Coatings of Polymers and Plastics*, (Marcel Dekker, Amsterdam, 2003).

Schieber F., "Modeling Appearance of Fluorescent Colors", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society, (2001).

Schrödinger E., "Theorie der pigmente von grösster leuchtkraft", *Ann. Physik*, **62**, 603-622 (1920).

Schwartz S., *Visual Perception, a clinical orientation*, (McGraw-Hill, United States of America, 2004).

Seim T.; Valberg A., "Towards a uniform color space: a better formula to describe the Munsell and OSA color scales", *Color Res. Appl.*, **11**, 11-24 (1986).

Sharma G., *Digital Color Imaging Handbook*, (CRC Press, Boca Raton, 2002).

Smith H. M, *High Performance Pigments*, (Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2002).

Smyth S., *The Print and Production Manual*, (Pira 9th, Leatherhead 2003).

Steingrímsson U., Simon K., Steiger W., and. Schläpfer K, "The gamut obtainable with surface colors", *Proceedings of First IS&T European Conference on Colour Graphics, Imaging and Vision*,

(Society for Imaging Science and Technology, Springfield, 2002), pp. 287-291.

Stenius S., "Optimal color and luminous fluorescence of bluish whites", *J. Opt. Soc. Am.*, **65**, 213-216, (1975).

Trussell H. J., "Applications of Set Theoretic Methods to Color Systems", *Color Research and Application*, **16**, 31-41 (1991).

Urtubia C. *Neurobiología de la visión* (Edicions UPC, Barcelona 1997), pp.241-247.

Valberg A., *Light Vision Color*, (John Wiley & Sons, England 2005).

Völz H. G., *Industrial Color Testing: Fundamentals and Techniques*, (Wiley-VCH, Weinheim 2001).

Wachtler T., Dohrmann U., Hertes R., "Modeling color percepts of dichromats", *Vision Research*, **44**, 2843-2855 (2004).

Wandell B.A., Silverstein D.L., *Digital Color Reproduction*, (In: S.K. Shevell (Ed.). *Science of Color*. 2nd ed., Elsevier, New York, 2003), pp. 281-316.

West G., "Conditions under which Schrödinger object colors are optimal", *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 1223-1225, (1983).

Wheeler I., *Metallic Pigments in Polymers*, (Rapra 1999).

Wyszecki G., Fielder G., "New color matching ellipses", *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 1135-1152 (1971).

Wyszecki G.; Stiles W. S., *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1982)

Zoido J.M., Carreño F., Bernabeu E., "Improved linear programming method to generate metameric spectral distributions", Applied Optics, **34**, 1938-1943 (1995).

"The Chemistry and Physics of Special-Effect Pigments and Colorants for Inks and Coatings", en www.specialchem4coatings.com (2003)

ANEXO

Se presenta a continuación una breve descripción de los espacios de color que se utilizan en este trabajo.

CIELAB

Este espacio de color (CIE 15:2004).se propuso explícitamente para el cálculo de diferencias de color, puede entenderse como el primero que lleva incorporada una transformada de adaptación cromática, por el hecho de incluir una normalización respecto al blanco de referencia. No considera las variaciones de iluminación ni la influencia del entorno, es por tanto un modelo de apariencia del color en la forma más simple posible.

Las coordenadas de este espacio de color vienen dadas en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* &= 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \\ b^* &= 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

donde la función f se define como:

$$f(X/X_n) = \begin{cases} (X/X_n)^{1/3} & \text{si } (X/X_n) > (24/116)^3 \\ (841/108)(X/X_n) + (16/116) & \text{si } (X/X_n) \leq (24/116)^3 \end{cases} \quad (27)$$

$$f(Y/Y_n) = \begin{cases} (Y/Y_n)^{1/3} & \text{si } (Y/Y_n) > (24/116)^3 \\ (841/108)(Y/Y_n) + (16/116) & \text{si } (Y/Y_n) \leq (24/116)^3 \end{cases} \quad (28)$$

$$f(Z/Z_n) = \begin{cases} (Z/Z_n)^{1/3} & \text{si } (Z/Z_n) > (24/116)^3 \\ (841/108)(Z/Z_n) + (16/116) & \text{si } (Z/Z_n) \leq (24/116)^3 \end{cases} \quad (29)$$

y el subíndice n indica el blanco visto bajo las mismas condiciones de iluminación.

Los descriptores perceptuales que se pueden definir en este espacio son la terna básica constituida por la claridad, el croma y el tono.

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (30)$$

$$h_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

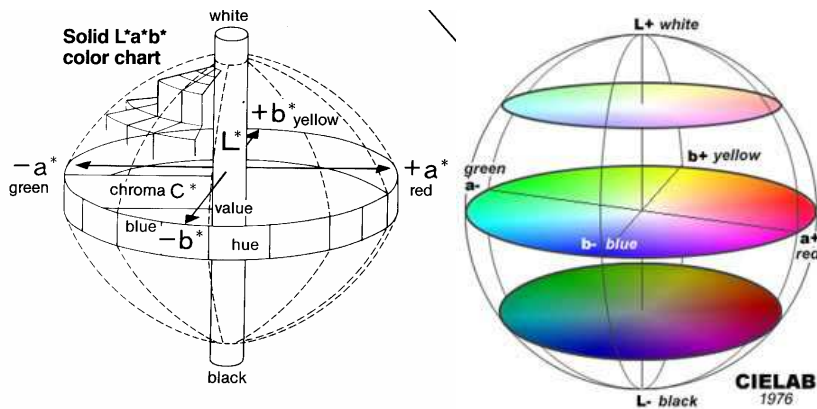


Figura 63. Diagramas del espacio de color CIELAB.

SVF

El modelo SVF, de Seim y Valberg (1986), impone la reproducción de los locus de croma constante del Munsell y la función que relaciona el número de fotones incidentes con la respuesta de los fotorreceptores, es decir intenta reproducir la respuesta real de los mismos.

La idea básica es la aplicación de funciones hiperbólicas para la respuesta fisiológica, que relacionan la absorción de la luz y la excitación de los tres tipos de conos con la respuesta visual. Una ecuación no lineal similar describe la relación entre el factor de luminancia Y y la magnitud de claridad V_y . A partir de estas funciones no lineales, y mediante combinaciones lineales de ellas, se describen las transformaciones de colores oponentes.

Dado un estímulo de coordenadas cromáticas (x,y) y factor de luminancia Y bajo un iluminante cualquiera, y calculados sus valores triestímulo, con Y normalizada a 1, se obtienen las excitaciones relativas de los conos, S'_i , mediante la transformación:

$$\begin{pmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = (a_{ij}) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (31)$$

donde (a_{ij}) es la matriz de los fundamentales de Pitt (1944), aunque los autores han hecho notar que el resultado del modelo no cambia de manera significativa si se utilizan los fundamentales de Walraven (1974), o los de Smith y Pokorny (1975) o los de Estévez (1979). Teniendo en cuenta que los valores triestímulo normalizados del iluminante XYZ_w , se calculan las excitaciones de los conos relativas al iluminante:

$$\begin{pmatrix} S'_{1w} \\ S'_{2w} \\ S'_{3w} \end{pmatrix} = (a_{ij}) \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} \quad (32)$$

El modelo introduce una etapa de adaptación cromática, de tipo von Kries, en los que S'_{iw} determinan los coeficientes de la matriz de adaptación:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/S'_{1w} & 0 & 0 \\ 0 & 1/S'_{2w} & 0 \\ 0 & 0 & 1/S'_{3w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Las respuestas de los tres tipos de conos, $v(S)$, se obtienen a partir de las excitaciones mediante la expresión:

$$v(S) = \begin{cases} \frac{(S - S_0)^n}{(S - S_0)^n + k} & \text{si } S \geq S_0 \\ 0 & \text{si } S < S_0 \end{cases} \quad (34)$$

donde S_0 es un valor umbral. La respuesta final de cada mecanismo vendrá dada por:

$$V(S) = V_M v(s) \quad (35)$$

donde la constante de escalado V_M es diferente para cada mecanismo.

En particular, la respuesta de los conos a un estímulo acromático viene dada por:

$$v_1(Y) = \begin{cases} \frac{(100Y - 0.43)^{0.51}}{(100Y - 0.43)^{0.51} + 31.75} & \text{si } Y \geq 0.0043 \\ 0 & \text{si } Y < 0.0043 \end{cases} \quad (36)$$

$$V_Y = 40v_1(Y) \quad (37)$$

A partir de las respuestas de los conos, se calculan dos coordenadas oponentes, F_1 y F_2 , que son transformaciones de los valores p_1 y p_2 , definidos como sigue:

$$p_1 = v_1(S_1) - v_1(Y) \quad (38)$$

$$p_2 = \begin{cases} v_1(S_3 = Y) - v_1(S_3) & \text{si } S_3 \leq Y \\ v_2(S_3 = Y) - v_2(S_3) & \text{si } S_3 > Y \end{cases} \quad (39)$$

donde $v_1(S_3)$ y $v_1(S_1)$ se calculan sustituyendo Y por S_3 y S_1 , respectivamente, en la expresión de $v_1(Y)$, y $v_2(S_3)$ se calcula sustituyendo Y por S_3 en la expresión de $v_1(Y)$, y

$$v_2(Y) = \begin{cases} \frac{(100Y / k(V_Y) - 0.1)^{0.86}}{(100Y / k(V_Y) - 0.1)^{0.86} + 103.2} & \text{si } Y \geq 0.001K(V_Y) \\ 0 & \text{si } Y < 0.001K(V_Y) \end{cases} \quad (40)$$

siendo:

$$k(V_Y) = 0.140 + 0.175V_Y \quad (41)$$

Con esto, el estímulo se describe finalmente mediante V_Y y las coordenadas F_1 , y F_2 , definidas como:

$$\begin{aligned} F_1 &= 700 p_1 - p_2 \\ F_2 &= 96.5 p_2 \end{aligned} \quad (42)$$

DIN99d

Fue desarrollado en 1999 por Rohner y Rich (Kuenhi, 2003) con la finalidad de encontrar una fórmula para la diferencia de color mejor que las propuestas con modelos anteriores. El espacio DIN99 es una transformación del espacio CIELAB, aplica transformaciones algorítmicas y una reescalación de las variables L^* y C^* y calcula unas nuevas coordenadas colorimétricas teniendo en cuenta la variable ángulo-tono de CIELAB. A partir de una primera fórmula de la diferencia de color se fueron desarrollando nuevas fórmulas que mejoraran la uniformidad de este espacio de color.

Kuenhi realizó una modificación a este espacio, al que se denominó DIN99d, donde propuso la transformación del valor triestímulo X , $X' = c_0 X - (c_0 - 1)Z$, donde c_0 es un coeficiente de optimización, con la finalidad de intentar mejorar la representación para las diferencias cromáticas en la región de los azules, donde con las ecuaciones del modelo anterior no se ofrecían buenos resultados.

Las ecuaciones que definen este espacio de representación son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 X' &= 1.12X - 0.12Z & C_{99d} &= 22.5 \ln(1 + 0.06G) \\
 L_{99d} &= 325.22 \ln(1 + 0.0036L^*) & h_{99d} &= \arctan\left(\frac{f}{e}\right) + 50^\circ \\
 e &= a^* \cos(50^\circ) + b^* \sin(50^\circ) & a_{99d} &= C_{99d} \cos(h_{99d}) \\
 f &= 1.14[-a^* \sin(50^\circ) + b^* \cos(50^\circ)] & b_{99d} &= C_{99d} \sin(h_{99d}) \\
 G &= \sqrt{e^2 + f^2}
 \end{aligned} \tag{43}$$

CIECAM02

Este modelo está basado directamente en el CIECAM97s, el cual fue desarrollado para ajustar un conjunto de datos y para comprender aspectos específicos del sistema visual humano (CIE 159: 2004).

El modelo CIECAM02 surgió de la necesidad de la mejora en su funcionalidad y la simplificación de algunos aspectos desarrollados en el CIECAM97s.

El modelo CIECAM02 necesita como entrada los valores triestímulo CIE-XYZ del color a estudiar y del blanco de referencia del sistema visual. Éstos son transformados y tras una adaptación cromática lineal, reescalado de la claridad y el croma y una compresión de la respuesta post-adaptada, son finalmente transformados en descriptores perceptuales: claridad, brillo, croma, saturación, colorido y tono.

La adaptación cromática se realiza mediante una transformación lineal, debido a la complejidad de una transformación no lineal, como es el caso del CIECAM97s, por su dificultad a la hora de invertirla. Los parámetros han sido elegidos de forma que se optimice el ajuste del mayor número de datos de un conjunto de prueba. Dicha transformación lineal se puede escribir matricialmente de la misma forma que realizamos un cambio de base, de XYZ a RGB:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (44)$$

En este modelo la visión del observador debería estar completamente adaptada al blanco de referencia. Cuando esta condición no se da, se calcula el parámetro D o grado de adaptación del punto blanco.

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3.6} \right) \exp \left(\frac{-(L_A + 42)}{92} \right) \right] \quad (45)$$

Y con dicho parámetro podemos reescalar los valores RGB obtenidos en la adaptación cromática:

$$\begin{aligned} R_C &= \left[\left(Y_W \frac{D}{R_W} \right) + (1 - D) \right] R \\ G_C &= \left[\left(Y_W \frac{D}{G_W} \right) + (1 - D) \right] G \\ B_C &= \left[\left(Y_W \frac{D}{B_W} \right) + (1 - D) \right] B \end{aligned} \quad (46)$$

donde R_W , G_W y B_W son los valores RGB del blanco de referencia calculados a partir de la ecuación 44. Ahora se calcula las siguientes constantes que también dependerán de las condiciones de observación:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{5 L_A + 1} \\ F_L &= 0.2 k^4 (5 L_A) + 0.1 (1 - k^4)^2 \sqrt[3]{5 L_A} \\ n &= \frac{Y_b}{Y_W} \\ N_{bb} = N_{cb} &= 0.725 \left(\frac{1}{n} \right)^{0.2} \\ z &= 1.48 + \sqrt{n} \end{aligned} \quad (47)$$

Para poder aplicar la compresión hay que cambiar de espacio, así que aplicamos el siguiente cambio de base para pasar al espacio de Hunt-Pointer-Estevez:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{HPE} \mathbf{M}_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix}$$

donde

$$\mathbf{M}_{HPE} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\mathbf{M}_{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix}$$

y ahora se realiza la compresión de la post-adaptación no lineal:

$$\begin{aligned} R'_a &= \frac{400 \left(F_L R' / 100 \right)^{0.42}}{27.13 + \left(F_L R' / 100 \right)^{0.42}} + 0.1 \\ G'_a &= \frac{400 \left(F_L G' / 100 \right)^{0.42}}{27.13 + \left(F_L G' / 100 \right)^{0.42}} + 0.1 \\ B'_a &= \frac{400 \left(F_L B' / 100 \right)^{0.42}}{27.13 + \left(F_L B' / 100 \right)^{0.42}} + 0.1 \end{aligned} \quad (49)$$

Si en estos cálculos cualquier valor R' , G' o B' es negativo se toma su valor absoluto y el cociente en las ecuaciones 49 se multiplica por -1 antes de sumarle el 0.1.

Ahora ya podemos volver a calcular sus valores en las coordenadas ab:

$$a = R'_a - \frac{12G'_a}{11} + \frac{B'_a}{11}$$

$$b = \left(\frac{1}{9}\right)(R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad (50)$$

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

El ángulo tono debería ser calculado en grados, teniendo en cuenta el signo de a y b para calcular correctamente el ángulo dependiendo del cuadrante en el que se encuentre.

Usando la ecuación 51 calculamos el parámetro e_t . En la Tabla 5 podemos encontrar los valores aproximados de dicho parámetro para los colores primarios.

$$e_t = \frac{1}{4} \left[\cos\left(h \frac{\pi}{180} + 2\right) + 3.8 \right] \quad (51)$$

Tabla 5. Datos de los colores primarios para el cálculo del tono (H).

	Rojo	Amarillo	Verde	Azul	Rojo
i	1	2	3	4	5
h_i	20.14	90.00	164.25	237.53	380.14
e_i	0.8	0.7	1.0	1.2	0.8
H_i	0.0	100.0	200.0	300.0	400.0

Para calcular el tono (H) para cualquier otro color habrá que realizar una interpolación lineal a partir de los valores de la tabla. Para ello realizamos el siguiente cambio de variable:

$$h' = h + 360 \quad \text{si } h < h_1$$

$$h' = h \quad \text{si } h \geq h_1 \quad (52)$$

y a continuación valorar entre qué valores de h_i y h_{i+1} se encuentra nuestro valor h' ($h_i \leq h' < h_{i+1}$), y así utilizarlos como referencia para interpolar :

$$H = H_i + \frac{100(h' - h_i) / e_i}{(h' - h_i) / e_i + (h_{i+1} - h') / e_{i+1}} \quad (53)$$

Finalmente ya estamos en condiciones de poder calcular el resto de parámetros perceptuales:

$$\text{Acromático: } A = \left[2R'_a + G'_a + \left(\frac{1}{20} \right) B'_a - 0.305 \right] \cdot N_{bb}$$

$$\text{Claridad: } J = 100 \left(\frac{A}{A_w} \right)^{cz}$$

$$\text{Croma : } C = t^{0.9} \sqrt{J/100} (1.64 - 0.29^n)^{0.73} \quad (54)$$

$$\text{donde } t = \frac{(50000/13)N_c N_{cb} e_t \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a}$$

$$\text{Brillo : } Q = \left(\frac{4}{c} \right) \sqrt{\frac{J}{100}} (A_w + 4) F_L^{0.25}$$

$$\text{Colorido : } M = C F_L^{0.25}$$

$$\text{Saturación: } s = 100 \sqrt{M/Q}$$

y sus correspondientes valores en coordenadas cartesianas ab son:

$$a_C = C \cos(h) \quad b_C = C \sin(h)$$

$$a_M = M \cos(h) \quad b_M = M \sin(h) \quad (55)$$

$$a_s = s \cos(h) \quad b_s = s \sin(h)$$

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE COLORES

A continuación mostramos una serie de muestras coloreadas que van a ser codificadas en los diferentes espacios de color descritos anteriormente, con el fin de poder observar las diferencias que se encuentran en los tres parámetros (claridad y coordenadas cromáticas) asociados a cada espacio.

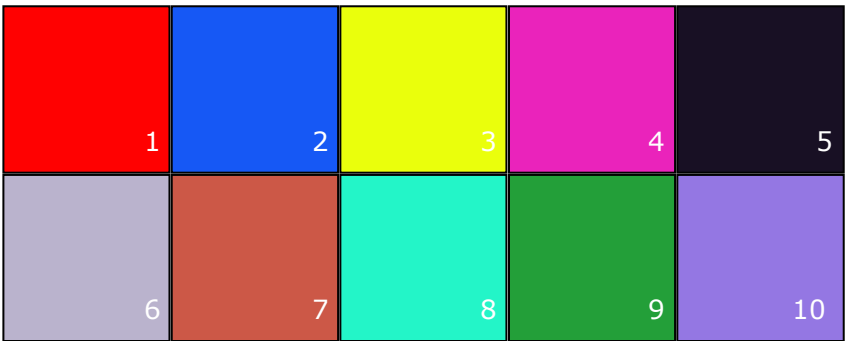


Figura 64. Muestras coloreadas

Las condiciones de observación o medida de cada una de las muestras se muestran en la siguiente figura:

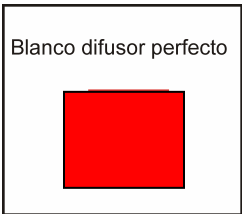


Figura 65. Condiciones de medida

En la siguiente tabla se muestran los datos colorimétricos para las muestras coloreadas en todos los espacios de color estudiados (CIELAB, SVF, DIN99d, CIECAM02).

Tabla 6. Datos colorimétricos de las muestras coloreadas en diferentes espacios de color

	CIELAB			SVF			DIN99d			CIECAM02		
	L*	a*	b*	V	F ₁	F ₂	L _{99d}	a _{99d}	b _{99d}	J	a _M	b _M
1	53.23	80.10	67.22	5.16	16.90	9.07	57.02	39.56	25.60	38.38	109.73	92.67
2	43.61	41.44	-83.48	4.19	1.88	-22.28	47.43	0.60	-41.34	22.89	73.94	-15.25
3	98.80	-35.50	94.39	9.79	-7.91	13.68	98.97	-11.35	43.18	96.54	91.63	-35.43
4	54.26	82.38	-32.14	5.27	19.88	-7.69	58.03	40.16	-17.39	38.85	84.85	81.32
5	5.78	9.08	-12.14	0.56	1.67	-2.32	6.70	6.53	-12.76	2.85	12.90	6.04
6	74.18	7.61	-9.57	7.30	1.65	-2.17	76.97	6.3878	-10.61	59.36	14.20	7.58
7	51.84	45.39	32.98	5.02	10.04	4.59	55.65	32.18	16.78	35.08	56.25	48.43
8	86.90	-57.52	8.32	8.59	-10.84	1.21	88.53	-36.51	6.96	74.32	58.48	-58.11
9	57.48	-54.13	43.21	5.59	-9.71	6.14	61.17	-28.43	25.29	36.60	61.69	-47.51
10	56.84	35.67	-50.35	5.52	6.61	-12.71	60.54	13.21	-31.75	37.95	17.54	-50.93